

Vysoká škola báňská- Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Diplomová práce

Vysoká škola báňská- Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

**Zpřesnění metodiky stanovení termokinetických vlastností
uhelného prášku**

Improvement of Method for Determination of Termokinetic
Parameters of Pulverized Coal

Student:

Bc. Radek Váni

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jiří Horák, Ph.D.

Ostrava 2011

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Radek Váni**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Zpřesnění metodiky stanovení termokinetických vlastností uhlého prášku**
Improvement of Method for Determination of Termokinetic Parameters of Pulverized Coal

Zásady pro vypracování:

Navrhněte zpřesnění metodiky získání termokinetických vlastností uhlého prášku zlepšením postupu při odběru vzorku při experimentálních zkouškách na Pádové trubce (PT). Řešení bude obsahovat vlastní konstrukční návrh nové soustavy odběru vzorku a ověření funkčnosti zařízení při experimentálních zkouškách na PT. Výsledky budou zpracovány ve formě technických výkresů a výpočty v programu Excel.

1. Teoretická část (současný stav vědění v oblasti stanovení termokinetických vlastností uhlého prášku)
2. Popis metody získání křivky vyhořívání (výpočet)
3. Návrh možných řešení pro zpřesnění metodiky stanovení termokinetických vlastností uhlého prášku
4. Návrh nové odběrové aparatury, zpracování výrobní dokumentace
5. Ověření nového postupu experimentálními zkouškami a zpracování výsledků
6. Závěry

Seznam doporučené odborné literatury:

1. NOSKIEVIČ, P.: Spalování uhlí, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2002, 68 s. ISBN 80-248-0204-X.
2. BALLESTER, J., JIMÉNEZ, S.: Kinetic parameters for the oxidation of pulverized coals measured from drop tube tests. Combustion and Flame, 142 (2005), p. 210–222
3. Metodika VECO 004: Stanovení popela v tuhém vzorku. VŠB – TU OSTRAVA, VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM, 8.4.2003
4. PALUSKA, R. Výpočet nejistoty stanovení nedopalu vzorku z Pádové trubky. VŠB – TU OSTRAVA, VÝZKUMNÉ ENERGETICKÉ CENTRUM, 12.1.2010


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Horák, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011




prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně, s pomocí vedoucího diplomové práce a literatury, která je uvedena v závěru práce. Děkuji vedoucímu práce Ing. Jiří Horák, Ph.D. za pomoc, bez níž by se práce vyvíjela o poznání složitěji.

V Ostravě, dne 23. 5. 2011

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě, dne

.....

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Adresa trvalého pobytu autora práce:

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

VÁNI, R. *Zpřesnění metodiky stanovení termokinetických vlastností uhelného prášku: diplomová práce*. Ostrava: VŠB- Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2011, 52s. Vedoucí práce: Horák, J.

Diplomová práce se zabývá vytvořením metodiky stanovení termokinetických vlastností uhelného prášku s použitím experimentálního zařízení tzv. Pádová trubka, které umožňuje simulaci podmínek panujících v reakčním prostoru kotlů velkých výkonů, spalující uhlý prášek. Popisuje hlavní vlivy na průběh spalování uhelného prášku a první kroky k zlepšení této metodiky. Do metodiky je nově zahrnutá nová chladicí odběrová sonda, v plynotěsném dvouplášťovém provedení pro zlepšení izolačních vlastností. Sonda je dále doplněna novým kryogenním regulačním ventilem pro jemnější regulaci dávkovaného média do sondy. Experimentální část popisuje vyhodnocování experimentálních zkoušek na pádové trubce a následné sestavení křivky vyhořívání uhelných částic. Grafická část obsahuje výrobní výkres odběrové sondy a kryogenního ventilu.

ANOTATION OF MASTER THESIS

VÁNI, R. *Improvement of Method for Determination of Termokinetic Parameters of Pulverized Coal: Master Thesis*. Ostrava: VŠB- Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energy Engineering, 2011, 52 p. Thesis head: Horák, J.

The thesis deals with creating a methodology for determining termokinetic parameters of pulverized coal using an experimental device called Drop tube, which allows the simulation of reaction conditions in the area of high- power boiler, burning pulverized coal. It describes the main influences on the course of combustion of pulverized coal and the first steps to improve the methodology. The methodology is new to the new coolant sampling probe in gas- tight double- shell design for improved insulation properties. The probe is further complemented by a new cryogenic valve for finer control of medium dispensed into the probe. The experimental section describes the use of experimental tests on drop tube assembly and subsequent curve burning coal particles. Graphs include manufacturing drawing cooling probe and cryogenic valves.

Obsah

| | |
|---|----|
| Seznam obrázků | 3 |
| Seznam grafů | 4 |
| Seznam tabulek | 4 |
| Seznam použitého označení | 5 |
| 1. Úvod | 8 |
| 2. Uhlí | 11 |
| 2.1 Druhy uhlí | 11 |
| 2.2 Složení uhlí | 13 |
| 2.3 Vlastnosti uhlí | 14 |
| 2.3.1 Spalné teplo a výhřevnost | 14 |
| 2.3.2 Hořlavina | 14 |
| 2.3.3 Popelovina a popel | 15 |
| 2.3.4 Obsah vody | 15 |
| 2.3.5 Zrnitost uhlí | 16 |
| 2.3.6 Další vlastnosti uhlí | 18 |
| 2.4 Energetické využívání uhlí a jeho vliv na životní prostředí | 18 |
| 2.5 Teorie reakční kinetiky | 19 |
| 3. Experimentální zařízení | 22 |
| 3.1 Princip činnosti PT | 22 |
| 3.2 Popis zařízení | 22 |
| 3.2.1 Parametry pádové trubky | 24 |
| 3.2.2 Příprava reakčního plynu | 24 |
| 3.2.3 Ohřev směsi reakčního plynu | 25 |
| 3.2.4 Reakční komora | 26 |

| | |
|--|----|
| 3.2.5 Dávkování paliva do RK..... | 27 |
| 3.2.6 Odběr vzorku z RK a jeho ochlazení | 27 |
| 3.2.7 PLC jednotka | 29 |
| 4. Úpravy na experimentálním zařízení..... | 30 |
| 4.1 Úpravy na dávkovacím zařízení | 30 |
| 4.2 Úpravy chladicí soustavy | 31 |
| 4.2.1 Zaizolování chladicí trasy | 31 |
| 4.2.2 Nový kryogenní ventil | 32 |
| 4.2.3 Výroba nové odběrové sondy | 33 |
| 4.3 Zkrácení reakční komory | 35 |
| 5. Experimentální zkoušky | 36 |
| 5.1 Zkoušky s hnědým uhlím..... | 36 |
| 5.2 Zkoušky s černým uhlím..... | 43 |
| 6. Závěr | 47 |
| 7. Použitá literatura | 48 |
| 8. Přílohy..... | 49 |

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obrázek 1 Lignit | 11 |
| Obrázek 2 Hnědé uhlí | 12 |
| Obrázek 3 Černé uhlí | 12 |
| Obrázek 4 Antracit | 12 |
| Obrázek 5 Přepočty mezi stavy | 13 |
| Obrázek 6 Uhelná elektrárna | 18 |
| Obrázek 7 Vliv teploty na změnu rychlostní konstanty | 20 |
| Obrázek 8 Diagram energetických změn během chemické reakce | 21 |
| Obrázek 9 Pádová trubka | 22 |
| Obrázek 10 Schéma PT | 23 |
| Obrázek 11 Směšovač | 24 |
| Obrázek 13 Model ohřívačku plynu | 25 |
| Obrázek 12 Topné spirály | 25 |
| Obrázek 15 Řešení Otápění RK | 26 |
| Obrázek 14 Schéma reakční komory | 26 |
| Obrázek 16 Vibrační dávkovač | 27 |
| Obrázek 17 Zachycovač s filtrem | 28 |
| Obrázek 18 Odběrová chladicí sonda | 28 |
| Obrázek 19 Úpravy na dávkovači | 31 |
| Obrázek 20 Zaizolování chladicí trasy | 32 |
| Obrázek 21 Kryogenní ventil | 32 |
| Obrázek 22 Původní regulace dusíku | 33 |
| Obrázek 23 Nová dvouplášťová odběrová sonda | 34 |
| Obrázek 24 Zkrácení reakční komory | 35 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 25 Nasítovaný vzorek o zrnitosti 80- 90 μm | 36 |
| Obrázek 26 Váha OHAUS..... | 37 |
| Obrázek 27 Exsikátor..... | 37 |
| Obrázek 28 Filtr se zachyceným vzorkem..... | 38 |
| Obrázek 29 Kelímek s navážkou | 38 |
| Obrázek 30 Kelímek s navážkou po vyžhání | 39 |
| Obrázek 31 Žhací pec | 39 |

Seznam grafů

| | |
|---|----|
| Graf 1 Struktura spotřeby primární energie ve světě | 8 |
| Graf 2 Struktura spotřeby primární energie v ČR..... | 9 |
| Graf 3 Charakteristiky zrnitosti uhlí | 17 |
| Graf 4 Křivka vyhořívání vzorku VZ 001/08 pro koncentraci kyslíku 2% | 41 |
| Graf 5 Křivka vyhořívání vzorku VZ 001/08 pro koncentraci kyslíku 6% | 42 |
| Graf 6 Srovnání křivek vyhořívání vzorku VZ 001/08..... | 42 |
| Graf 7 Srovnání křivek vyhořívání vzorků se starou a novou odběrovou sondou | 43 |
| Graf 8 Srovnání křivek vyhořívání vzorku VZ 013/10..... | 44 |
| Graf 9 Křivka vyhořívání vzorku VZ 013/10 pro koncentraci kyslíku 2 %obj..... | 45 |
| Graf 10 Křivka vyhořívání vzorku VZ 013/10 pro koncentraci kyslíku 4 %obj..... | 46 |
| Graf 11 Křivka vyhořívání vzorku VZ 013/10 pro koncentraci kyslíku 6 %obj..... | 46 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tabulka 1 Základní rozdělení obsahu vody | 15 |
| Tabulka 2 Výpočet doby setrvání vzorku v RK | 29 |
| Tabulka 3 Hrubý rozbor hnědého uhlí VZ 001/08 | 36 |

| | |
|---|----|
| Tabulka 4 Checklist | 38 |
| Tabulka 5 Naměřená a vypočtená data pro sestavení křivek vyhořívání VZ 001/08 | 40 |
| Tabulka 6 Hrubý rozbor černého uhlí VZ 013/10 | 43 |
| Tabulka 7 Naměřená a vypočtená data pro sestavení křivek vyhořívání VZ 013/10 | 44 |

Seznam použitého označení

Zkratky

| | |
|-----|-------------------------------|
| VEC | Výzkumné energetické centrum |
| PLC | Programmable logic controller |
| PT | pádová trubka |
| RK | reakční komora |
| VZ | vzorek |
| HU | hnědé uhlí |
| ČU | černé uhlí |
| PEZ | primární energetické zdroje |

Veličiny

| | | |
|-----------|---|----------------------|
| A | předexponenciální faktor | $[s^{-1}]$ |
| A | obsah popela ve vzorku | $[\%]$ |
| C | obsah uhlíku ve vzorku | $[\%_{hm.}]$ |
| C^{fix} | obsah fixního uhlíku ve vzorku | $[\%_{hm.}]$ |
| C_{O_2} | objemová koncentrace kyslíku v reakčním plynu | $[\%_{obj.}]$ |
| E_a | aktivační energie | $[J.K^{-1}mol^{-1}]$ |
| H | obsah vodíku ve vzorku | $[\%_{hm.}]$ |
| N | obsah dusíku ve vzorku | $[\%_{hm.}]$ |
| O | obsah kyslíku ve vzorku | $[\%_{hm.}]$ |

| | | |
|-------------|--|---|
| Q_i | výhřevnost | [MJ.kg ⁻¹] |
| Q_n | spalné teplo | [MJ.kg ⁻¹] |
| R | univerzální plynová konstanta | [J.K ⁻¹ .mol ⁻¹] |
| S | obsah síry ve vzorku | [% _{hm.}] |
| T | teplota | [°C] |
| U | nespálená frakce | [% _{hm.}] |
| V^{daf} | hmotnostní podíl prchavé hořlaviny v hořlavině | [% _{hm.}] |
| b | koefficient jemnosti mletí | [1] |
| h | obsah hořlaviny ve vzorku | [% _{hm.}] |
| h_{vz} | hmotnost hořlaviny v odebraném vzorku | [g] |
| k | rychlostní konstanta | [s ⁻¹] |
| m_1 | hmotnost filtru | [g] |
| m_2 | hmotnost kelímku | [g] |
| m_3 | hmotnost kelímku s navážkou | [g] |
| m_4 | hmotnost kelímku s navážkou po vyžhání | [g] |
| m_5 | hmotnost odebraného vzorku | [g] |
| m_6 | hmotnost vzorku po vyžhání | [g] |
| $m_{ub,fr}$ | hmotnost úbytkové frakce | [g] |
| $m_{vz,0}$ | hmotnost nadávkovaného vzorku před vstupem do RK | [g] |
| t | čas | [s] |
| v | rychlost chemické reakce | [s ⁻¹] |
| v | rychlost reakčního plynu | [m.s-1] |
| w | obsah vody v testovaném vzorku | [% _{hm.}] |
| x_0 | charakteristický rozměr zrna | [1] |

Použité Indexy

horní

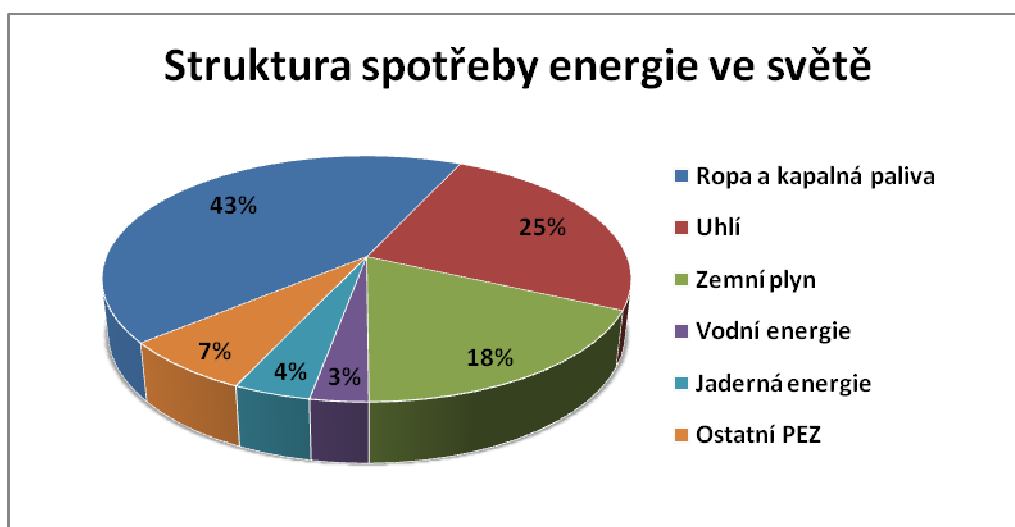
| | |
|-----|--------------------|
| r | surové palivo |
| a | analytický vzorek |
| d | bezvodý vzorek |
| h | hořlavina |
| daf | zdánlivá hořlavina |

spodní

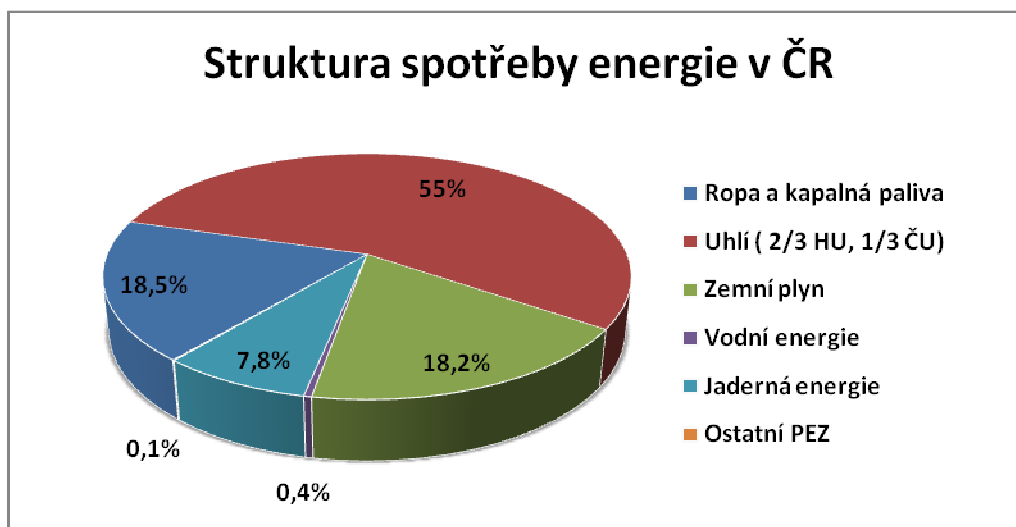
| | |
|------|-------------------|
| fix | tuhá fáze |
| spal | spalitelná (síra) |
| u | uhlí |
| z | zbytek |
| t | celkový obsah |

1. Úvod

Při řešení problému zásobování energií se v současné době dostává stále více do popředí požadavek čistějšího a efektivnějšího využití paliv. Hlavní složku energetické spotřeby stále tvoří fosilní paliva. Mezi fosilní paliva se řadí uhlí, ropa a zemní plyn. Ropa se podílí více než čtyřiceti procenty, uhlí a zemní plyn zhruba po dvaceti procentech [9]. Zbytek připadá na veškeré další zdroje, převážně alternativní a v neposlední řadě také jaderné palivo. Přehled využívání primární energie poukazuje Graf 1 a Graf 2 [8]. Protože se kapalná paliva uplatňují především v dopravě, má klasická energetika k dispozici uhlí a zemní plyn. Na výrobě elektřiny se podílí uhlí asi čtyřiceti, zatímco zemní plyn zhruba deseti procenty [9]. Je to dáno nejen historicky (uhlí má nejdelší tradici jako zdroj energie, zatímco historie zemního plynu začíná zhruba ve čtyřicátých letech minulého století), ale také ekonomicky. Ceny uhlí jsou dlouhodobě poměrně stabilní a v přepočtu na jednotku energie podstatně nižší, než je cena zemního plynu, která dlouhodobě kolísá spolu s cenou ropy. Zatímco světové zásoby uhlí jsou poměrně přesně známy a jejich životnost se odhaduje na cca 200 let, je kapacita zásob zemního plynu nejasná s životností mezi padesáti až sto léty [9]. V České republice jsou k dispozici pozoruhodné zásoby uhlí, včetně uhelné tradice, kdyžto zemní plyn je nutno v plné míře importovat. Dlouhodobý růst cen zemního plynu je více než pravděpodobný, zatímco světové ceny uhlí se zřejmě nebudou výrazně měnit a navíc je uhlí domácí surovinou, což souvisí s vytvářením pracovních míst a se sociální politikou vůbec [8].



Graf 1 Struktura spotřeby primární energie ve světě



Graf 2 Struktura spotřeby primární energie v ČR

Ve všech nejvyspělejších zemích světa probíhá v současné době velmi intenzivní vývoj moderních technologií využití uhlí v energetice. Nové technologie jsou zaměřeny na zlepšení dvou klíčových parametrů uhelných zdrojů - celkové účinnosti a environmentální přijatelnosti. Zvýšení účinnosti bloku zvyšuje jeho konkurenceschopnost, zatímco požadavek environmentální přijatelnosti vychází z předpokladu stále rostoucích a rozšiřujících se požadavků na ochranu životního prostředí [9]. Nejpropracovanější technologii dnes představují uhelné bloky spalující uhelný prášek. Jemné mletí zabezpečuje stabilní spalovací proces, což umožňuje v maximální měře uplatnit primární DENOX opatření a minimalizovat ztráty nedokonalým spalováním. Ve všech nejvyspělejších zemích světa probíhá v současné době velmi intenzivní vývoj moderních technologií využití uhlí v energetice [9]. Nové technologie jsou zaměřeny na zlepšení dvou klíčových parametrů uhelných zdrojů - celkové účinnosti a environmentální přijatelnosti. Zvýšení účinnosti bloku zvyšuje jeho konkurenceschopnost, zatímco požadavek environmentální přijatelnosti vychází z předpokladu stále rostoucích a rozšiřujících se požadavků na ochranu životního prostředí. Nejpropracovanější technologii dnes představují uhelné bloky spalující uhelný prášek. Jemné mletí zabezpečuje stabilní spalovací proces, což umožňuje uplatnit primární DENOX opatření a minimalizovat ztráty nedokonalým spalováním [8]. Aby bylo těchto požadavků dosaženo, je potřeba mimo jiné správně pochopit a popsat chování uhelného prášku během spalovacího procesu ve velkých zdrojích a tyto poznatky využít při navrhování nových uhelných bloků.

Tyto důvody měly za následek vybudování experimentálního zařízení v prostorách zkušebny Výzkumného energetického centra, sloužící ke stanovení termokinetických vlastností práškového uhlí. Zařízení zvané pádová trubka dokáže simulovat podmínky panující v reakčním prostoru kotlů velkých uhelných bloků spalujících práškové uhlí a to za předem přesně stanovených okrajových podmínek, kterými jsou teplota, koncentrace kyslíku a rychlost proudění reakčního plynu v reakční komoře. Výsledkem experimentu je pak tzv. křivka vyhořívání, která charakterizuje vlastnosti daného paliva při procesu vyhořívání v oxidačním prostředí [6].

2. Uhlí

Uhlí je hořlavá hornina vzniklá v průběhu desítek až stovek milionů let složitými procesy, které se v dřívějších dobách říkalo „hořlavý kámen“. Jde o tedy nerostné palivo v tuhém skupenství, které vzniklo z nahromaděných odumřelých rostlinných látek a zbytků nižších živočichů usazujících se v bažinách, kde nízké hladiny kyslíku bránily jejich kompletnímu rozkladu a oxidaci [7]. Uhlí je složeno především z uhlíku, vodíku a kyslíku, obsahuje však také další chemické prvky především síru. Získává se dolováním z povrchových nebo hlubinných dolů a používá se jako palivo. Od doby průmyslové revoluce je uhlí dodnes nejvýznamnějším pevným palivem a jedním z nejvýznamnějších zdrojů elektrické energie [10]. Velká část světové výroby elektřiny (40%) využívá spalování uhlí, které probíhá v klasických uhelných respektive v tepelných elektrárnách. Uhlí se kromě výroby elektrické energie používá také k vytápění a ohřevu vody (výroba technologického tepla) [10].

2.1 Druhy uhlí

Podle složení, způsobu vzniku, stáří a energetické vydatnosti se rozlišuje několik základních druhů uhlí.

Lignit Je druh hnědého uhlí, které je nejmladší a nejméně prouhelněné tzn. nejméně kvalitní (viz Obrázek 1). Jedná se o uhlí třetihorního původu. Obsahuje zachované kmeny a menší či větší úlomky dřev. Obsahuje 30-50% uhlíku, 50% vody a složky síry. Výhřevnost lignitu je okolo 13MJ/kg [10]. Ve světě je lignit zahrnován pod hnědé uhlí. V České republice jde o dvě samostatné skupiny. Lignit používá v energetice jako palivo [7].



Obrázek 1 Lignit

Hnědé uhlí znázorněno na Obrázku 2 je druh méně kvalitního uhlí, používaný především jako palivo pro získávání energie a tepla. Hnědé uhlí je geologicky mladší než černé uhlí. Kromě uhlíku obsahuje velké množství příměsí, především různých popelovin a síry, obvykle také mnoho vody. Hnědé uhlí má výhřevnost 15- 20 MJ/kg, obsah uhlíku 50- 80% a větší procento vody (5- 40%) oproti černému uhlí [7].



Obrázek 2 Hnědé uhlí

Černé uhlí zvané někdy také kamenné uhlí je druh usazené horniny, která vznikla z organického materiálu v prvohorách a druhohorách řadí se mezi uhlí, viz Obrázek 3. Černé uhlí má výhřevnost 18 - 30 MJ/kg, malé procento vody a prchavých látek. Obsahuje uhlíku 80- 90 %. Od hnědého uhlí se liší větší výhřevností a menším množstvím popela, který zbude po shoření. Používá jako kvalitní palivo pro tepelné elektrárny generující většinu elektrické energie na světě [7].



Obrázek 3 Černé uhlí

Antracit je druh černého uhlí, který se vyznačuje nejnižším obsahem těkavých hořlavých látek (12 - 8 % hmotnosti), vysokým obsahem uhlíku (nad 90 %) a velkou výhřevností (26 - 30 MJ/kg). Je to černé uhlí (viz Obrázek 4), které bylo v době svého vzniku vystaveno velkému tlaku a teple. Používá se na vytápění a k výrobě chemikálií [7].



Obrázek 4 Antracit

2.2 Složení uhlí

Jednotlivé druhy uhlí se liší geologickým stářím, kterým je určeno prouhelnatění jeho organické hmoty a složením. Organická složka uhlí sestává z pěti prvků – C, H, O, N, S – z nichž rozhodující vliv na spalovací proces mají první tři, zatímco zbývající dva podstatnou měrou určují množství škodlivin (NO_x a SO_2), vznikajících při spalování [1].

Z hlediska kalorické hodnoty jsou aktivními (hořlavými) složkami uhlík, vodík a část síry, a jednotlivé druhy uhlí se liší obsahem nejdůležitější aktivní složky, tj. uhlíku. Vedle aktivních složek obsahuje uhlí složky pasivní (nehořlavé), k nimž patří dusík, kyslík, popelovina a voda. Z tohoto hlediska se dělí uhlí na hořlavinu, popelovinu a vodu, tzv. hrubý rozbor [1].

$$h + A + w = 1 \quad (1)$$

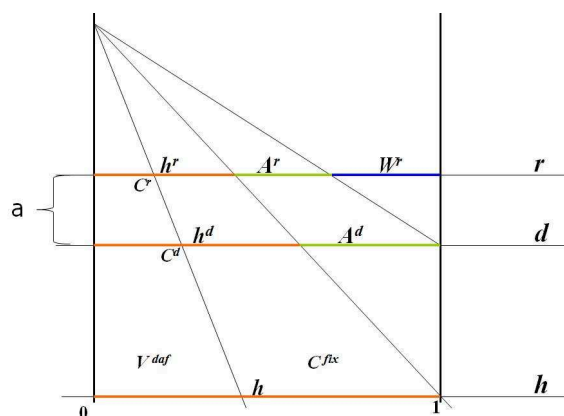
Kalorická hodnota uhlí je obsažena v hořlavině a závisí na jejím elementárním složení.

$$C^h + H^h + N^h + O^h + S_{spal}^h = 1 \quad (2)$$

Zatímco výhřevnost hořlaviny konkrétního druhu paliva v dané lokalitě má obvykle téměř konstantní hodnotu, je výhřevnost surového uhlí proměnná, což je způsobeno rozdílným obsahem pasivních složek – popeloviny a vody [1].

$$C^r + H^r + N^r + O^r + S_{spal}^r + A^r + w^r = 1 \quad (3)$$

Složení je možno ještě vyjádřit v analytickém vzorku (index a) a vzorku bezvodém, tzv. sušina (index d), získanou teoretickým odstraněním veškeré vody v palivu [10]. Podíly jednotlivých prvků nebo složek se dají přepočítat z jednoho stavu na druhý, jak znázorňuje Obrázek 5.



Obrázek 5 Přepočty mezi stavy

2.3 Vlastnosti uhlí

2.3.1 Spalné teplo a výhřevnost

Teplo, které se uvolní dokonalým spálením jednoho kilogramu paliva při ochlazení spalin na počáteční teplotu, přičemž zkondenzuje vodní pára, se nazývá spalné teplo Q_n^r . Pokud vodní pára nezkondenzuje, tedy neodevzdá své výparné teplo, jedná se o výhřevnost Q_i^r . Rozdíl tedy tvoří výparné teplo vodní páry. Protože je při spalování hořlaviny ve spalinách obsažena pouze odpařená voda, vzniklá spálením vodíku (z 1kg vodíku vznikne zhruba 9kg vody) a výparné teplo vody při teplotě 20°C činí 2453,5kJ/kg, platí mezi spalným teplem a výhřevností hořlaviny vztah [1]:

$$Q_n^h = Q_i^h + 9 \cdot H^h \cdot 2453,5 \text{ [kJ / kg]} \quad (4)$$

Obsah vodíku v hořlavině černého uhlí je cca 5- 5,5% a u hnědého uhlí 5,5- 6,5% [10].

Při spalování uhlí je navíc ve spalinách obsažená voda z paliva, takže platí vztah:

$$Q_n^r = Q_i^r + (w + 9 \cdot H^r) \cdot 2453,5 \text{ [kJ / kg]} \quad (5)$$

Vysušením lze zvýšit výhřevnost paliva, jelikož dojde k zvýšení podílu hořlaviny a zároveň k úbytku vody v palivu. Hodnoty spalného tepla a výhřevnosti se tedy přibližují [1].

Spalné teplo či výhřevnost lze také vypočítat, známe-li prvkové složení hořlaviny. Výpočtových vzorců je celá řada, kde nejstarším je vzorec dle Dulonga [1]. Jednotlivé vzorce nejsou univerzální, platí pouze pro určitá uhlí. Vzorec dle Dulonga je určen pro geologické starší uhlí.

$$Q_i^r = 33,91 \cdot C^r + 121,42 \cdot H^r - 15,18 \cdot O^r + 10,47 \cdot S^r - 2,45 \cdot w^r \text{ [MJ / kg]} \quad (6)$$

2.3.2 Hořlavina

Sumární obsah všech spalitelných látek obsažených v uhlí je označován jako hořlavina. Její obsah se určuje hmotovým úbytkem po dokonalém spálení vzorku. Hořlavina se dělí na prchavou hořlavinu V^{daf} a tuhý zbytek C^{fix} . Prchavá hořlavina se zjišťuje z úbytku hmotnosti vzorku žíháním (zrnitost pod 0,2 mm, 7 min, teplota 850°C).

Výhřevnost prchavé hořlaviny se pohybuje v rozmezí 20- 56 MJ/kg, zatímco výhřevnost tuhého zbytku je konstantní, cca 33,9 MJ/kg [10].

Prchavá hořlavina zásadně ovlivňuje průběh vzněcování paliva. Nejvíce prchavých látek se uvolňuje již při teplotách 200- 400°C, což je oblast zápalných teplot dehtových par. Jejich hoření inicializuje proces hoření a tedy růst teploty. Při teplotách 450- 650°C se zapaluje vodík a uhlovodíky, teplota plamene roste a následně dochází k zapálení tuhého zbytku [10].

Tuhý zbytek představuje převládající složku hořlaviny, doba jeho hoření bývá 90% z celkové doby hoření paliva. Toto hoření nejvíce ovlivňuje tepelné podmínky v ohništi [1].

2.3.3 Popelovina a popel

Popel je podíl paliva, který získáme jeho dokonalým spálením. Vzniká z minerálních složek obsažených ve spalovaném palivu, které se nazývají popeloviny [1]. Popelovina se při spalování v laboratorních podmínkách mění v popel, a v provozních v tzv. tuhé zbytky, které opouštějí kotel ve formě strusky, škváry nebo popílku. Popel stejně jako voda je nežádoucí složkou paliva, jak z hlediska výhřevnosti, tak z hlediska chování paliva (jeho spékání, struskování, prašnosti spalin atd.).

Laboratorně stanovený obsah popela A se přepočítává na obsah popelovin M pomocí součinitele f, jehož hodnota je pro domácí uhlí vždy $1,1 < f < 1,2$. Nižší hodnoty platí pro černé a vyšší pro hnědé uhlí [1].

$$M = f \cdot A \quad (7)$$

2.3.4 Obsah vody

Voda obsažená v palivu představuje balastní látku, která snižuje výhřevnost uhlí, a při spalování zvětšuje objem spalin a tím i komínovou ztrátu. Základní rozdělení obsahu vody ve vzorku znázorňuje Tabulka 1.

| Celková (veškerá) | | |
|-------------------|-------|----------|
| Přimíšená (volná) | Hrubá | Zbytková |

Tabulka 1 Základní rozdělení obsahu vody

Přímíšená (volná) voda se do uhlí dostává při těžbě, a lze ji od paliva oddělit mechanicky (odkapáváním, filtrací apod.)

Hrubá voda představuje množství uvolněné vody při volném vysychání vzorku na vzduchu.

Zbytková voda se uvolňuje při sušení vzorku paliva za zvýšené teploty při 105°C (zbytek po odpaření hrubé vody).

Při stanovení obsahu vody v surovém vzorku, je třeba počítat s tím, že se část vody odpaří již při odběru, skladování či dopravě. Problém odpařování řeší použití utěsněných nádob, nebo co nejrychleji určit obsah vody ve vzorku a následným přepočtem složení analytického vzorku na původní stav [1].

2.3.5 Zrnitost uhlí

Zrnitost uhlí se udává hmotnostními podíly zrn určitých velikostí v jednotce. Použití druhu uhlí z hlediska zrnitosti závisí na technologii spalování. Kotle roštové vyžadují uhlí tříděné (velikost zrna 6 - 20mm), aby se dosáhlo rovnoměrného průchodu spalovacího vzduchu vrstvou paliva. Pro prášková ohniště se uhlí naopak mele na uhelný prášek, a zvýšený obsah prachového podílu je naopak výhodou (snížení nákladů na mletí) [1].

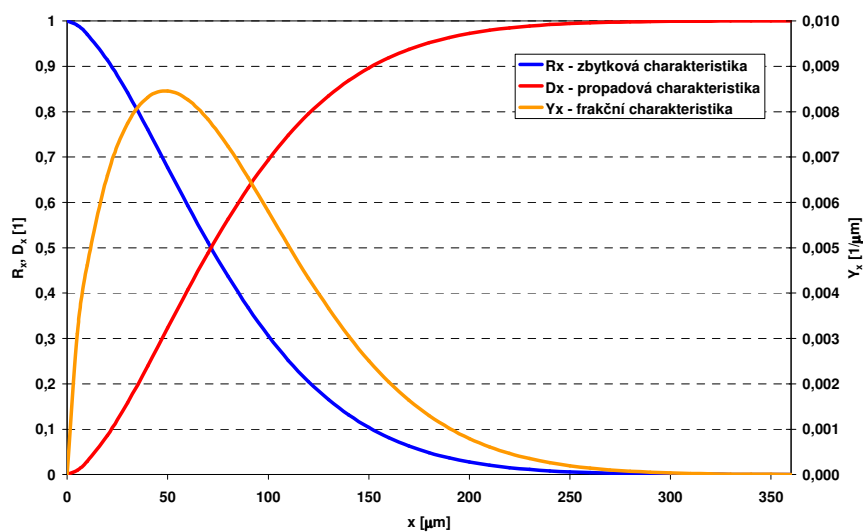
Rozměr zrna určuje velikost jeho povrchu, připadajícím na 1kg uhlí (tzv. měrný povrch). U uhelného prášku může dosahovat hodnot tisíce m²/kg. Chemické reakce převážně probíhají na povrchu paliva, proto je jemnost mletí označována za významný faktor ovlivňující rychlost hoření [1].

Zrnitost uhlí se udává třemi způsoby (viz Graf 3):

Frakční charakteristika- hmotnostní podíl zrn y_x v určitém rozsahu velikosti zrn

Zbytková charakteristika- hmotnostní podíl zbytku R_x na sítích s příslušnou velikostí ok x .

Propadová charakteristika- hmotnostní podíl propadu D_x síty s příslušnou velikostí ok x .



Graf 3 Charakteristiky zrnitosti uhlí

Nejpoužívanější matematická formulace zbytkové charakteristiky je Rosin-Rammlerův vztah (8), nejlépe vyhovující pro uhelný prášek a popílek.

$$R_x = e^{-b \cdot x^n} = e^{-(x/x_0)^n} \quad [1] \quad (8)$$

Zde koeficient b představuje způsob a jemnost mletí, a koeficient n vnitřní skladbu velikosti zrn. Parametr x_0 je definován jako charakteristický rozměr zrna, kterému přísluší zbytek na síti 36,8% (odvozeno níže (9)) [1].

Pro polydisperzní směs $n=0$, kde mají všechny velikosti zrn stejný poměrný zbytek na síti, platí:

$$R_x = e^{-1} = \frac{1}{e} = 0,368 \quad [1] \quad (9)$$

Největší význam má zrnitost při spalování uhelného prášku, kde jemnost mletí je jedním z faktorů podporující kvalitu spalování. Díky této matematické formulaci stačí palivo přesít jedním sítem a zbytek dopočítat. Volí se především síta z velikostí ok 90 a 200 μm , přičemž rozměr 200 μm je považován za hranici mezi jemnou a hrubou frakcí [1].

2.3.6 Další vlastnosti uhlí

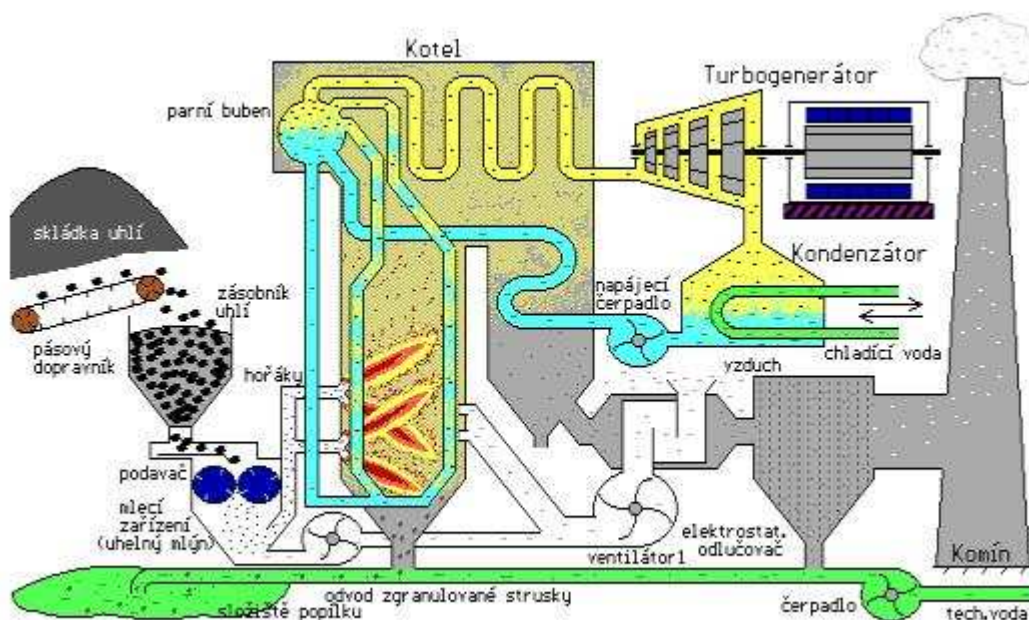
Melitelnost je vlastnost uhlí, dělit se na menší částice mechanickým působením. Je to rovněž porovnávací hodnota, udávající, kolik energie je potřeba k rozemletí uhlí na prášek požadované jemnosti [10].

Spékavost je vlastnost uhlí spojovat se ve shluky, což je nepříznivé při spalování na roštu, protože se vytváří spečená vrstva, nepropustná pro spalovací vzduch [10].

Samovznětlivost je schopnost uhlí se samovolně vznítit při skladování na velkých hromadách (malý odvod tepla). Oxidační reakce probíhá i při běžných venkovních teplotách. Samovznícení napomáhá rovněž nesterilní zrnitost (přítomnost prachu) [10].

2.4 Energetické využívání uhlí a jeho vliv na životní prostředí

Uhlí je dodnes nejvýznamnějším pevným palivem a jedním z nejvýznamnějších zdrojů elektrické energie. V České republice se z uhlí získává přibližně polovina veškeré vyrobené elektřiny. V dnešní době při vývoji a aplikaci uhelných technologií se pozornost zaměřuje stále častěji na procesy práškové technologie spalování (viz Obrázek 6), která dokáže spálit palivo s vysokým obsahem popele a vody s účinností blízkou 45% [8].



Obrázek 6 Uhelná elektrárna

Vysušené a na jemný prášek umleté uhlí je práškovými hořáky foukáno do spalovací komory kotle spolu s předeheřtým spalovacím vzduchem. Uhelná částice je unášena proudem vzduchu a spalín spalovací komorou, postupně vyhořívá a předává teplo teplosměnným plochám kotle. Tuhé zbytky uhelných částic padají ve formě granulované strusky do vynašeče umístěného na dně spalovací komory. Odtud jsou dopravovány k dalšímu zpracování nebo uložení. Část vyhořených uhelných částic je ve formě popílku unášena spalínami do odlučovačů, kde je popílek s účinností blízkou 100 % zachycován. Oxid siřičitý je ze spalín odstraňován až za kotlem, a to pomocí různých technologií, zpravidla tzv. vápencové vypírky. Celý spalovací proces je plně automatizovaný tak, aby uhlí bylo spáleno co nejdokonaleji [7].

Spalování uhlí produkuje oxid uhličitý spolu s proměnným množstvím oxidu siřičitého v závislosti na kvalitě [10]. Oxid siřičitý reaguje s vodou za tvorby kyseliny siřičité. Jestliže se dostane do atmosféry, reaguje s vodní párou a vrací se na zem ve formě kyselých dešťů. Emise z uhelných elektráren představují největší umělý zdroj oxidu uhličitého a tím s velkou pravděpodobností výrazně přispívají ke globálnímu oteplování [1]. Moderní elektrárny využívají mnoho technik pro omezení škodlivosti odpadních látek a zvýšení účinnosti. Ačkoli jsou tyto techniky široce využívány v některých zemích, jsou pořád příliš drahé [10].

2.5 Teorie reakční kinetiky

Úkolem reakční kinetiky je určit rychlost chemických reakcí a její závislost na faktorech, které ji ovlivňují (koncentrace, teplota, na přidavku malého množství určitých látek, tzv. katalyzátorů) [5].

Závislost rychlosti chemické reakce na koncentraci výchozích látek formuloval Guldberg-Waagův zákon, který říká, že rychlost chemických reakcí je přímo úměrná součinu molárních koncentrací výchozích látek [5].

Pro reakci:



je rychlost:

$$v = k \cdot [A] \cdot [B] \quad (11)$$

Hodnota rychlostní konstanty k , udává rychlost chemické reakce při jednotkových koncentracích a je pro danou reakci za určité teploty konstantní. Její hodnota pro odlišné reakce je různá [11].

Rychlosti homogenních reakcí v naprosté většině případů rostou se zvyšující se teplotou [5]. Empirické zkoumání ukázalo, že mnoho reakcí má rychlostní konstanty, jež splňují tzv. Arrheniovu rovnici (12) :

$$k = Ae^{\frac{E_a}{RT}} \quad (12)$$

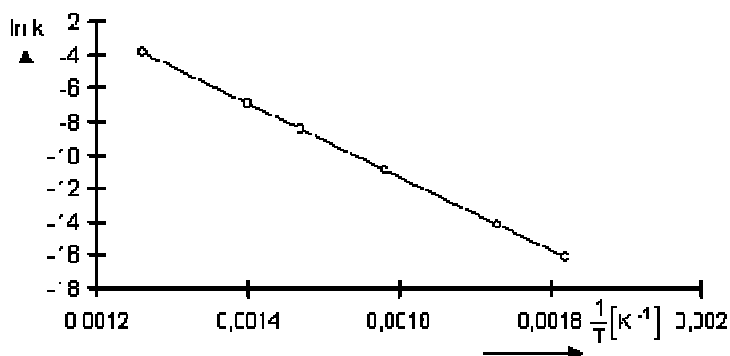
kde A je tzv. předexponenciální faktor neboli frekvenční faktor, E_a je aktivační energie, která je pro každou reakci charakteristická a v nepříliš velkém rozmezí teplot je na teplotě prakticky nezávislá, R je univerzální plynová konstanta, T je teplota a e je základ přirozených logaritmů [5].

Z rovnice (12) vyplývá, že stoupá-li teplota, roste hodnota rychlostní konstanty dané reakce. Vzhledem k exponenciálnímu charakteru této závislosti lze již poměrně malým zvýšením teploty dosáhnout značného zvýšení rychlosti reakce. U většiny reakcí stačí zvýšení teploty o 10°C ke zdvojnásobení až zčtyřnásobení rychlosti reakce [5].

Aktivační energii reakce lze zjistit z experimentálních výsledků na základě zlogaritmované formy Arrheniovy rovnice:

$$\ln k = -\frac{E_a}{R} \frac{1}{T} + \ln A \quad (13)$$

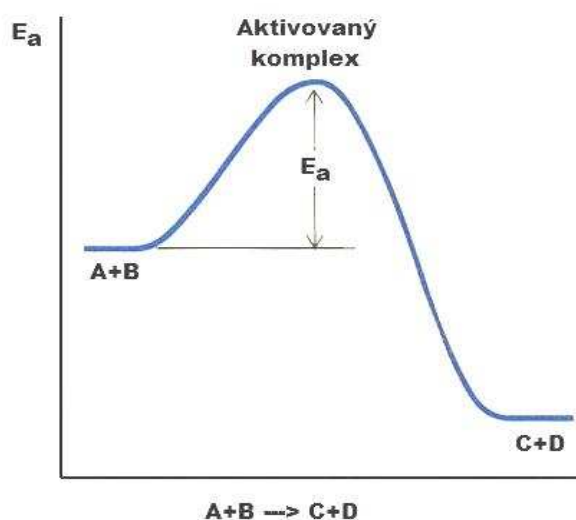
Grafem závislosti $\ln k$ na $1/T$ je přímka, její směrnice je rovna $-E_a/R$ (viz. Obrázek 7). Po dosazení do rovnice (10) získáme předexponenciální faktor.



Obrázek 7 Vliv teploty na změnu rychlostní konstanty

Vliv některých faktorů na rychlost chemické reakce můžeme odvodit na základě srážkové teorie, která zjednodušeně znázorňuje, jakým způsobem se přeměňují výchozí látky na produkty [11].

Podle srážkové teorie se může uskutečnit reakce mezi reagujícími částicemi, např. mezi atomy, molekulami, ionty, jedině tehdy, když se tyto částice při svém chaotickém pohybu srazí. Všechny srážky částic však nevedou k přeměně výchozích látek na produkty, tj. všechny srážky nejsou efektivní. Jedině ty částice, které mají dostatek kinetické energie, se mohou k překonání energetického valu přeměnit na produkty. Na vrcholu tohoto energetického valu se vytvoří aktivovaný komplex, znázorněný na Obrázku 8 [11].



Obrázek 8 Diagram energetických změn během chemické reakce

Z tohoto grafu vyplývá, že rychlost chemické reakce závisí na výšce energetického valu. Výška tohoto valu nezávisí na teplotě, ale na přítomnosti katalyzátoru [5].

Katalyzátory jsou takové látky, které ovlivňují výšku energetického valu. Pozitivní katalyzátory zvyšují rychlost chemických reakcí, protože snižují výšku energetického valu. Negativní katalyzátory, tzv. inhibitory, naopak rychlost chemické reakce zpomalují. Katalyzátory se během reakce nespotřebovávají, protože se účastní pouze tvorby nestálých meziproduktů. Při rozpadu meziproduktu se katalyzátory znovu uvolňují. Proto se katalyzátory do výsledné chemické reakce nezahrnují [11].

3. Experimentální zařízení

Termokinetické vlastnosti představující průběh vyhořívání uhlých částic a kinetické parametry E_a a A při spalování uhlého prášku jsou získány na základě dat z experimentálních zkoušek na zařízení zvané pádová trubka (viz Obrázek 9) [2]. Celkový pohled na systém pádové trubky znázorňuje Příloha A.

3.1 Princip činnosti PT

Dlouhou vertikální trubicí proudí ve směru gravitačního pole plyn konstantní rychlostí, konstantního složení a teploty. Uvedené parametry lze v určitém rozsahu měnit. V různých výškách trubice jsou umístěny otvory, do kterých je pneumaticky vstřikován uhlý prášek chlazenou dávkovací sondou. Postupným zvyšováním místa vstřiku se prodlužuje doba hoření částic. Tím lze zajistit potřebnou dobu pro dokonalé vyhoření [6]. Částice uhlého prášku se během pádu postupně zahřívají, vysušují a dochází k uvolnění a vyhoření prchavé hořlaviny, a následně souběžně s homogenním spalováním probíhá vyhoření fixního uhlíku. Na konci trubice dojde k prudkému zchlazení kapalným dusíkem a vzorek se zachytí na bezpopelovém filtru. Odebraný vzorek následuje k analýze, kde se stanoví nedopal (množství nevyhořelého uhlíku) v závislosti na době setrvání uhlých částic v reakční komoře. Z výsledku stanovení nedopalu se poté sestaví křivky vyhořívání uhlých částic v čase [6].



Obrázek 9 Pádová trubka

3.2 Popis zařízení

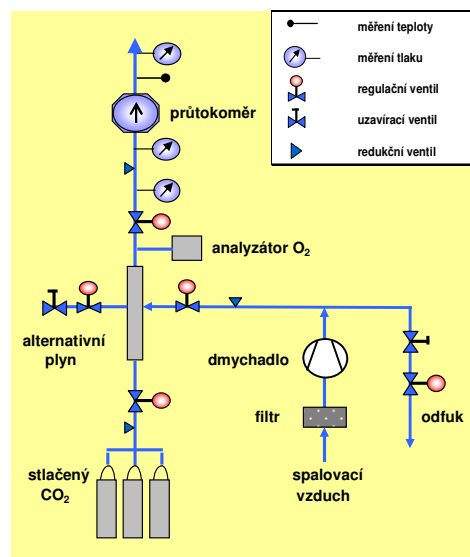
Experimentální zařízení nazývané Pádová trubka (dále jen PT) je unikátní projekt, který slouží ke stanovení termokinetických vlastností práškového uhlí. Tyto vlastnosti jsou charakterizovány kinetickými parametry (aktivační energie E_a a před-exponenciální faktor A) a zejména průběhem vyhořívání uhlých částic [2]. Funguje na principu simulace podmínek panujících v reakčním prostoru kotlů velkých uhlých bloků spalujících práškové uhlí. Výsledkem tohoto experimentu budou tzv. křivky vyhořívání, které slouží k lepšímu

3.2.1 Parametry pádové trubky

- koncentrace O_2 ve směsi plynu 0 - 21 % (koncentrace CO_2 a N_2 se mění v závislosti na změně koncentrace kyslíku)
- provozní teplota v reakční komoře 600 až 1200 °C
- rychlost reakčního plynu v reakční komoře 1 - 4 m.s⁻¹ v závislosti na ostatních parametrech (koncentrace kyslíku v reakčním plynu a jeho teplota)
- délka reakční komory 4800 mm, vnitřní průměr 66 mm
- počet vstříků – 8
- doba setrvání uhlíkových částic v závislosti na délce trajektorie v reakčním prostoru a rychlosti proudění reakčního plynu

3.2.2 Příprava reakčního plynu

Sekce 1 představuje směřování plynů, viz Obrázek 11, s účelem dosáhnout požadované koncentrace kyslíku v rozmezí 0- 21%_{obj}. K namíchání směsi dochází v tzv. směšovači, do kterého je pomocí ventilátoru vháněn atmosférický vzduch, který je zbaven tuhých částic pomocí filtru umístěného na vstupu do dmyhadla. Odfuk napojený za ventilátorem umožňuje ochlazování dmyhadla z důvodu jeho přehřívání způsobeno velkou tlakovou ztrátou na celé trati. Z vysokotlakého svazku lahví umístěného poblíž zařízení, přivádíme do směšovače technický CO_2 z cílem snížení koncentrace kyslíku. Do směšovače je rovněž napojen přívod pro alternativní plyn (např. N_2), který je možno v případě potřeby použít. Přívody vzduchu a CO_2 jsou opatřeny redukčními ventily, sloužící k nastavení požadovaného tlaku plynu vstupujícího do směšovače [6].



Obrázek 11 Směšovač

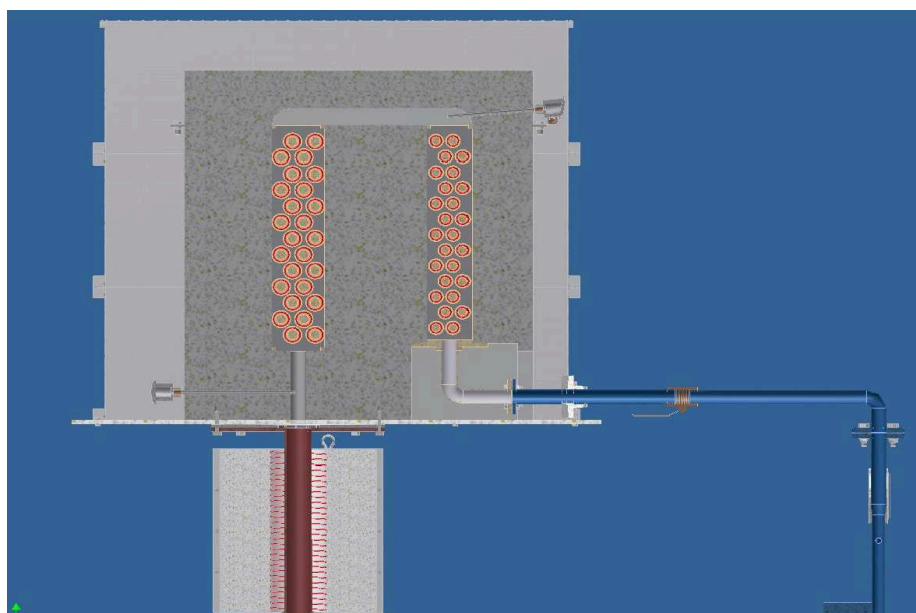
Takto připravený smíšený plyn dále pokračuje směrem do ohříváku plynu, přičemž se změní jeho průtok, teplota, tlak a koncentrace kyslíku. Na základě těchto údajů se řídí regulace směřování kyslíku s CO_2 a rychlost proudění ohřátého reakčního plynu v reakční komoře.

3.2.3 Ohřev směsi reakčního plynu

Připravený reakční plyn o požadované koncentraci kyslíku proudí do elektrického ohříváku reakčního plynu s vestavěnými topnými spirálami, znázorněny na Obrázku 12. Ohřívák plynu má dvě sekce, viz Obrázek 13. V první sekci je ohřev plynu elektricky omezen na maximální teplotu 600. Druhá sekce představuje tzv. dohřev plynu na požadovanou teplotu až 1200°C . Obě sekce ohříváku plynu jsou regulovány na základě naměřených teplot pomocí termočlánku typu K u přehřevu a typu S u dohřevu. Na konci ohříváku je umístěna homogenizační mřížka, sloužící k usměrnění proudu reakčního plynu proudícího následně směrem dolů do reakční komory PT, temperované rovněž na maximální teplotu 1200°C [6].



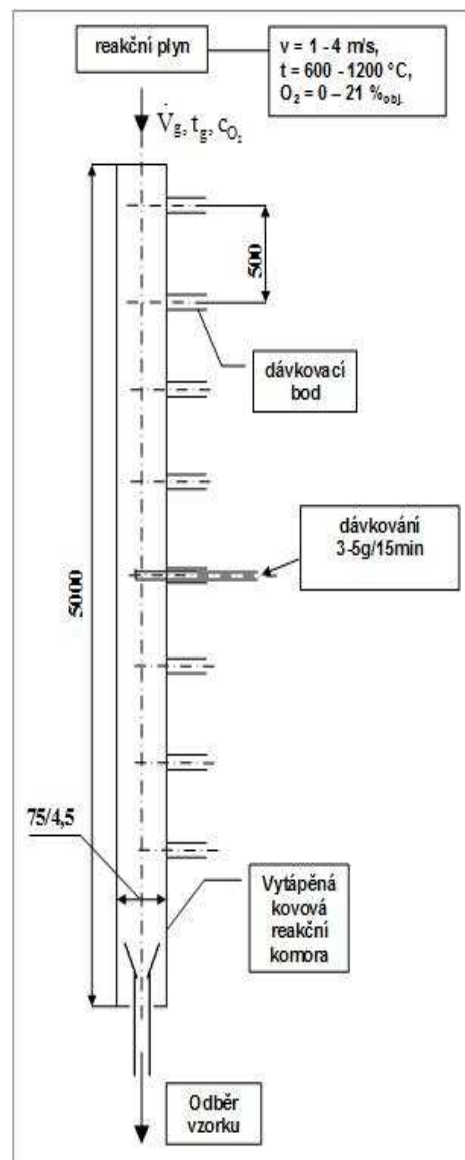
Obrázek 12 Topné spirály



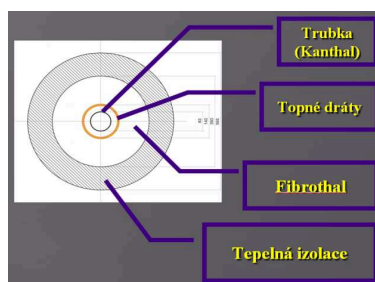
Obrázek 13 Model ohříváku plynu

3.2.4 Reakční komora

Reakční komora pádové trubky je plynotěsná, 4800 mm dlouhá vertikálně zavěšená trubice (viz Obrázek 14) o průměru 66 mm vyrobená ze speciální slitiny KANTHAL APM ($\text{Fe}_{75}\text{Al}_{20}\text{Cr}_5$) odolávající vysokým teplotám v oxidačním prostředí. Ze složení je zřejmé že materiál komory obsahuje zhruba 20% hliníku, který během provozu reaguje s kyslíkem a vytváří na povrchu trubice vrstvu korundu (Al_2O_3), která chrání vnitřní povrch komory před další oxidací [6]. Komora je připevněna k ohřívačku přírubou s těsněním. Reakční komora je z vnější strany otápěna elektrickými topnými moduly (19x) o maximální teplotě 1300°C a výkonu $5955\text{W}/70,1\text{ V}$ na 1 modul. Moduly jsou obaleny 40mm vrstvou tepelné izolace z materiálu Fibrothal a nerezovým plechem tloušťky 1mm (viz Obrázek 15). Do komory je navařeno 8 uzavíratelných vstříků o $\varnothing 19,1/1,3\text{ mm}$, rozteč 250 mm, délka 133 mm. Na vnější stěně komory je po celé výšce rovnoměrně rozloženo 10 kusů termočlánků typu S, sloužící ke snímání povrchové teploty stěny reakční komory, na základě které se reguluje otápění reakční komory [6].



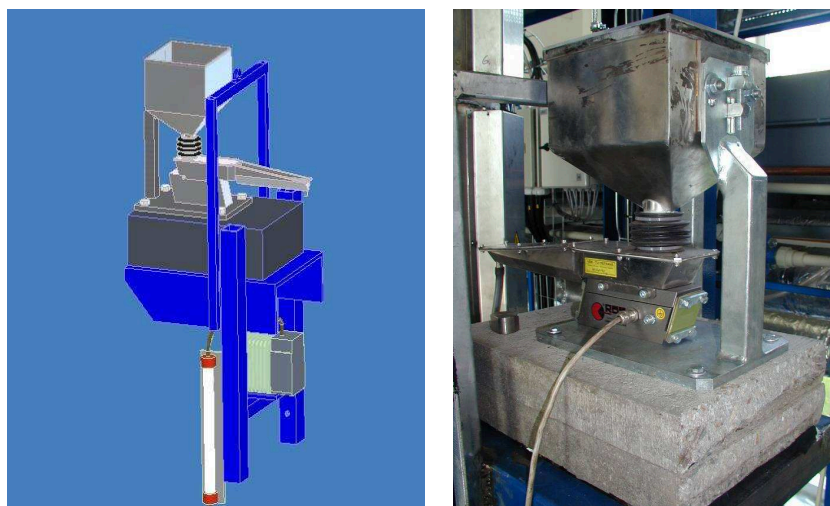
Obrázek 14 Schéma reakční komory



Obrázek 15 Řešení Otápění RK

3.2.5 Dávkování paliva do RK

Vzorek je do reakční komory dopravován pneumaticky malým množstvím plynu odebíraným ze zkratu (odbočky) před ohřívákem reakčního plynu (viz. Obrázek 10 sekce IV). Kontinuální dávkování vzorku je zajištěno plynotěsným vibračním podavačem umístěným na vertikálně posuvném pojezdu, který sype vzorek do proudu nosného dopravního plynu [6]. Dávkovač je vybaven regulátorem, který slouží k plynulému nastavení množství dávkovaného paliva. Pojezd lze možno posunovat po celé výšce reakční komory, a po umístění k požadovanému vstříku je aretován, což zabrání možným vibracím do nosné konstrukce zařízení. Proudící dopravní plyn unáší vzorek skrz vodou chlazenou dávkovací sondu do reakční komory. Rychlost plynu proudícího z dávkovací sondy je rovna rychlosti plynu v reakční komoře [6]. Kontrola rychlosti se provádí pomocí průtokoměru umístěného pod dávkovačem, viz Obrázek 16.



Obrázek 16 Vibrační dávkovač

3.2.6 Odběr vzorku z RK a jeho ochlazení

Odběr vzorku pro stanovení jednoho bodu vyhořivací křivky je prováděn po dobu 15 minut, během této doby je do reakční komory nadávkováno přibližně 5 gramů vzorku. Spalováním vzorku dochází k exotermické reakci a ke spotřebovávání obsahu kyslíku v reakčním plynu. Z tohoto důvodu je nutné dávkovat jen velmi malé množství vzorku, tak aby nedocházelo k ovlivňování nastaveného reakčního prostředí v reakční komoře [6]. Na konci reakční komory je umístěna odběrová chladicí sonda (viz Obrázek 18), která

zajišťuje prudké ochlazení reakčního plynu se vzorkem pod teplotu 50°C. Chlazení je zajišťováno vstřikováním kapalného dusíku v ústí odběrové chladicí sondy. Na ústí chladicí sondy dochází k odpařování tekutého dusíku, míchání s horkým reakčním plynem s obsahem vzorku, které způsobí ochlazení a zastavení všech probíhajících reakcí. Následně je tato směs prosávána skrz planární plochý filtr (viz Obrázek 17) o průměru 300 mm, který zachytí částice větší než 2,5 μm a je vyroben z bezpopelového materiálu (maximální obsah popela 0,007 %) [6]. Dále je směs odsávána rootsovým dmychadlem mimo prostor laboratoře. Sací výkon rootsova dmychadla je regulován tak, aby byl v reakční komoře udržen přetlak cca několik Pa. Mírný přetlak zajistí odsátí reakčního plynu včetně vzorku z reakční komory a zároveň nebude přisáván vzduch z okolí, který by mohl ovlivnit výsledek měření [6].



Obrázek 17 Zachycovač s filtrem



Obrázek 18 Odběrová chladicí sonda

Za účelem udržování teploty nižší než 50 °C je v propojovacím koleně mezi zachycovačem tuhých částic a plastovou hadicí napojenou do dmychadla, vytvořen prostor pro snímání teploty termočlánkem typu K. Snímaná teplota tímto termočlánkem slouží obsluze jako kontrolní hodnota pro ruční regulaci množství vstřikovaného kapalného dusíku do sondy [6]. Teplota se zobrazuje měřicím softwarem na nainstalovaným na PC pro měření účinností se zabudovanou měřicí ústřednou.

Doba setrvání vzorku v reakční komoře je dána kombinací vzdálenosti dávkovacího otvoru od odběrové sondy a nastavené rychlosti reakčního plynu v komoře (Tabulka 2). Během "pádu" částic paliva (vzorku) v reakčním horkém plynu směrem k bodu prudkého ochlazení, dochází k jeho zahřívání, sušení, spalování těkavých frakcí a nakonec dochází ke spalování fixního uhlíku. Vzorek, jež byl po určitý čas vystaven prostředí s definovanou teplotou, v reakčním plynu o definovaném obsahu kyslíku, který je zachycen na filtru je poté analyzován pro stanovení nespálených frakcí. Tyto hodnoty slouží ke stanovení vyhořivací křivky, která charakterizuje dané uhelné palivo s danou granulometrií za stanovených reakčních podmínek [6].

| Bod | Trajektorie částic | Doba setrvání částic v reakční komoře PT v závislosti na rychlosti reakčního plynu | | | |
|-----|-----------------------|---|--------|----------|--------|
| | | 1[m/s] | 2[m/s] | 2,4[m/s] | 3[m/s] |
| [-] | [m] | [ms] | [ms] | [ms] | [ms] |
| 0 | 0,53 | 530 | 265 | 221 | 177 |
| 1 | 0,8 | 800 | 400 | 333 | 267 |
| 2 | 1,3 | 1300 | 650 | 542 | 433 |
| 3 | 1,8 | 1800 | 900 | 750 | 600 |
| 4 | 2,3 | 2300 | 1150 | 958 | 767 |
| 5 | 2,8 | 2800 | 1400 | 1167 | 933 |
| 6 | 3,3 | 3300 | 1650 | 1375 | 1100 |
| 7 | 3,8 | 3800 | 1900 | 1583 | 1267 |
| 8 | 4,3 | 4300 | 2150 | 1792 | 1433 |

Tabulka 2 Výpočet doby setrvání vzorku v RK

3.2.7 PLC jednotka

Celý systém přípravy reakčního plynu včetně jeho ohřevu a udržování požadované teploty v reakční komoře je řízen pomocí PLC jednotky (programmable logic controller) umístěné vedle pádové trubky (viz Příloha 10.2). Součástí PLC jednotky je vizualizační PC stanice, ve které je nainstalována vizualizace pro ovládání systému pádové trubky [6].

4. Úpravy na experimentálním zařízení

Hlavním cílem bylo vylepšení kryogenní soustavy sloužící k okamžitému zchlazení reakčního plynu na teplotu přibližně 20 °C a následném odsátí tohoto plynu vývěvou (Rootsovým dmychadlem). Předešlá kryogenní soustava nesplňovala podmínky pro dokonalé zchlazení reakčního plynu. Během experimentálních zkoušek na PT bylo obtížné regulovat množství kapalného dusíku proudícího do odběrové sondy. Teploty, které se měřily za zachycovačem tuhých částic byly značně rozdílné. Často se dosáhlo vlivem vysoké teploty (kolem 70°C) k propálení filtru a tím i k samotnému přerušení zkoušky. Dříve docházelo také k velké spotřebě kapalného dusíku a vývěva nebyla schopna odsát veškerý reakční plyn z odběrové sondy. Tyto faktory nás vedly k myšlence jak nejlépe zdokonalit kryogenní soustavu.

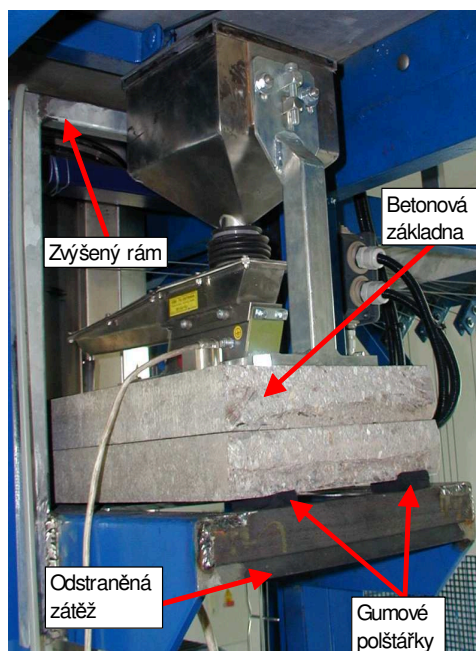
Aby se dosáhlo přesnějších výsledků získaných při experimentálních zkouškách, bylo nutné provést změny nejen na kryogenní soustavě, ale i na jiných částech pádové trubky. Ty nejdůležitější změny včetně těch na kryogenní soustavě jsou popsány v následující kapitole.

4.1 Úpravy na dávkovacím zařízení

Problémy se stabilitou dávkování měly za následek nezdařené předchozí experimenty. Dávkování nebylo kontinuální a odvíjelo se od polohy vibračního podavače po výšce konstrukce. U dolních vstříků bylo dostatečné, ale se zvýšením polohy směrem nahoru docházelo k nepravdělnostem a výpadkům dávkování. Tento problém byl způsoben především přenosem vibrací vibračního dávkovače do nosné konstrukce PT.

Vzhledem k tomu, že již nebylo technicky možné provést vyztužení nosné konstrukce PT, bylo navrženo zvětšit hmotu základny vibračního podavače. Pokus navařit na pojezd další ocelový materiál a tím zvýšit hmotnost celého dávkovacího zařízení nám problém s přenosem vibrací neodstranil.

Poté byly k vlastnímu vibračnímu podavači připevněny šrouby díly betonu, které byly ještě podloženy gumovými polštářky, viz Obrázek 19. Po určitém čase je potřeba polštářky vyměnit z důvodu jejich zhutnění. Tímto krokem se však výrazně snížily přenosy vibrací do okolí.



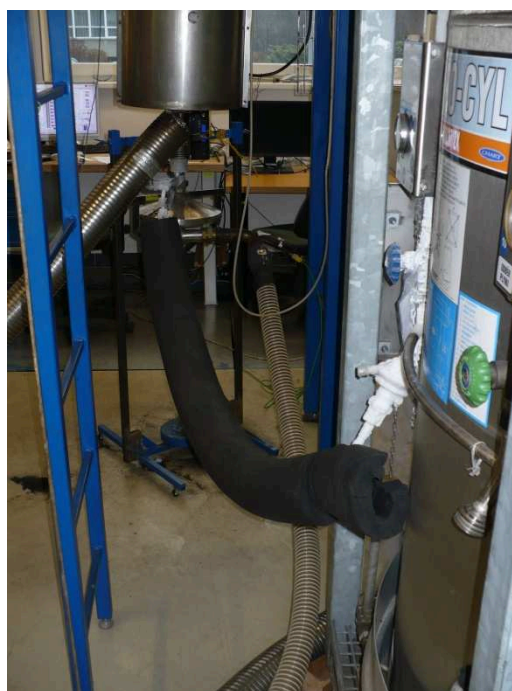
Obrázek 19 Úpravy na dávkovači

4.2 Úpravy chladicí soustavy

Inovace v oblasti chladicí soustavy přináší hlavně úspory ve spotřebě chladicího média a plynulejší regulaci chladicího média.

4.2.1 Zaizolování chladicí trasy

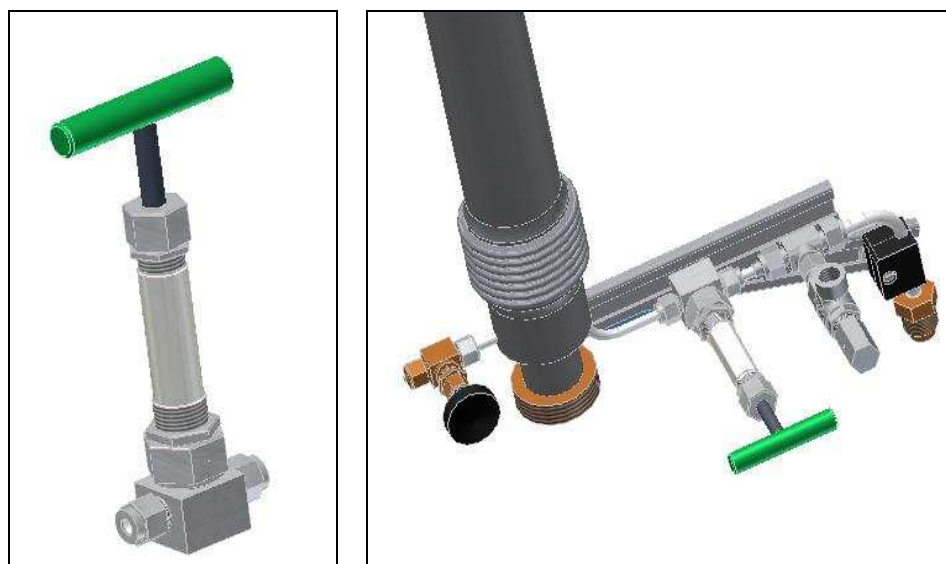
Jedním z problémů bylo odsávání ochlazeného reakčního plynu spolu s odpařeným kapalným dusíkem. Podle propočtů měla vývěva (Rootsovo dmychadlo) bez problému zvládat odběr takového množství plynu, které vznikne ochlazením horkého reakčního plynu pomocí kapalného dusíku. Ve skutečnosti běželo dmychadlo na plný výkon, ale přetlak v reakční komoře byl stále příliš vysoký. Bylo evidentní, že dmychadlo nezvládá odsávat veškeré množství plynu. Z toho důvodu nebylo možné určit, jaká je skutečná doba zdržení vzorku v reakční komoře a naměřené výsledky nemohly být přesné. Tento problém byl způsoben odpařováním kapalného dusíku během jeho dopravy z kryogenní nádoby do vlastní odběrové sondy. Jako řešení bylo navrženo zaizolování větší části dopravní cesty (viz Obrázek 20). Díky tomu došlo k ustálení odsávání plynů, dmychadlo pracuje na cca 60 % výkonu a tlak v reakční komoře je stabilní.



Obrázek 20 Zaizolování chladicí trasy

4.2.2 Nový kryogenní ventil

Pro lepší dávkování kapalného dusíku do odběrové sondy, byl zakoupen nový regulační ventil od americké firmy Swagelok (viz Obrázek 21), který dokáže regulovat průtok chladicího média daleko přesněji, než regulační ventil předešlý.



Obrázek 21 Kryogenní ventil

V předešlé verzi byl regulační ventil umístěn přímo na kryogenním zásobníku tekutého dusíku (viz Obrázek 22), a tedy délka potrubí za regulačním prvkem byla mnohem delší, čímž snadněji docházelo k odpařování dusíku již v samotném potrubí a delším časům potřebným pro stabilizaci chladicího systému a tedy i k vyšší spotřebě dusíku. Toto provedení je podřízeno nutností zchlazení reakčního plynu o teplotě 800 až 1200°C dusíkem na teplotu pod 50°C během jednotek milisekund.



Obrázek 22 Původní regulace dusíku

Výkresová dokumentace kryogenního ventilu, nakreslená pomocí programů Autodesk Inventor 2010 a Autocad 2008 je uložena na vnitřní straně zadního příděští a přiloženém CD.

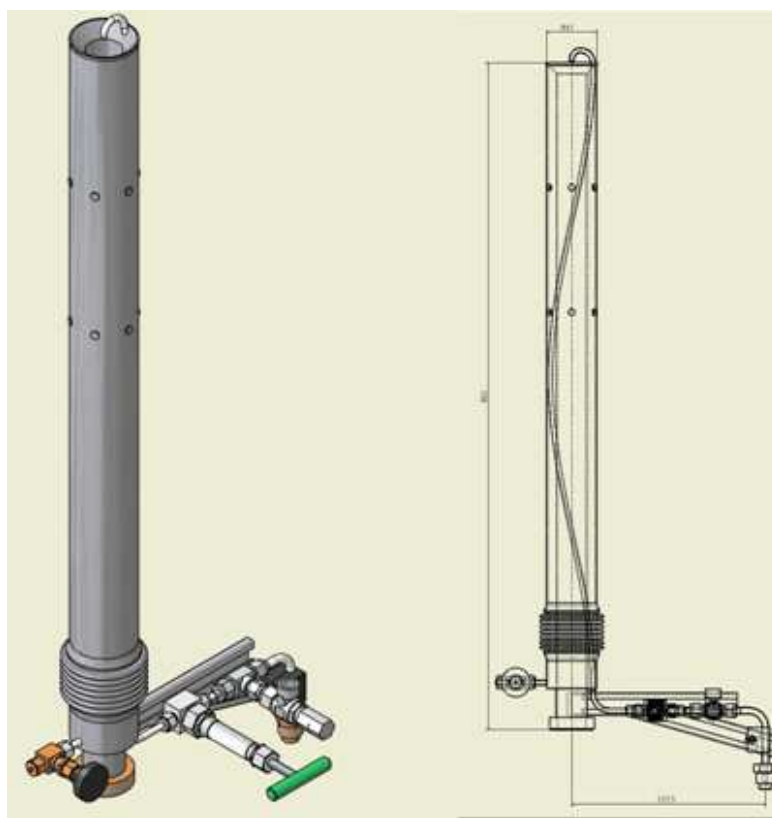
4.2.3 Výroba nové odběrové sondy

Pro zlepšení metodiky stanovení termokinetických vlastností uhlénohřídky byla navržena, zkonstruována a odzkoušena nová odběrová chladicí sonda (viz Obrázek 23), která umožňuje přesnější odběr vzorků uhlénohřídky z reakční komory.

Byl vylepšen systém dopravy kapalného dusíku k ústí odběrové sondy. U původní sondy docházelo k odpařování kapalného dusíku již v přívodním potrubí a u ústí chladicí sondy bylo velmi těžké udržet stabilní podmínky výtoku kapalného dusíku. Dále byly

zlepšeny izolační vlastnosti konstrukce sondy, tak aby bylo možné odběrovou sondu vsunout do horké reakční komory až do hloubky cca 560 mm. Tímto opatřením je možno zkrátit vzdálenost mezi nejbližším dávkovacím otvorem a ústím sondy.

Odběrová sonda byla navržena jako dvouplášťová, v meziplášti vakuovaná. Vakuum v sondě slouží ke zlepšení izolačních vlastností sondy. Jako přídatná izolace je v meziplášti nasypán perlit. Vstupní strana sondy má tvar kónického difusoru do jehož středu je trubičkou vstřikován kapalný dusík. Množství dávkovaného kapalného dusíku je regulováno kryogenním jehlovým ventilem, který je nově umístěn v těsné blízkosti chladicí odběrové sondy.



Obrázek 23 Nová dvouplášťová odběrová sonda

Výkresová dokumentace nové odběrové sondy, nakreslená pomocí programů Autodesk Inventor 2010 a Autocad 2008 je uložena na vnitřní straně zadního příděští a přiloženém CD.

4.3 Zkrácení reakční komory

Další úpravou bylo zkrácení reakční komory (viz. Obrázek 24) na úroveň posledního topného modulu. Ke zkrácení došlo z toho důvodu, aby bylo možné zasunout co nejvíce sondu do reakční komory a tím co nejvíce zkrátit délku trajektorie vzorku na nejnižším bodě (pro rychle vyhořívající vzorky).



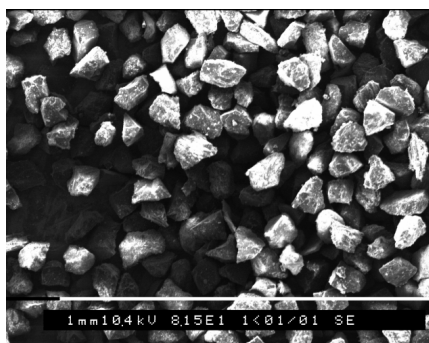
Obrázek 24 Zkrácení reakční komory

5. Experimentální zkoušky

Stěžejní částí celého procesu stanovení termokinetických vlastností práškového uhlí jsou experimentální zkoušky. Získání jednoho bodu na křivce vyhořívání pro dané uhlí za předem zvolených parametrů plynu předchází celá řada úkonů, které jsou popsány v této kapitole.

5.1 Zkoušky s hnědým uhlím

Ve dnech 21.9. – 24.9.2010 proběhlo na pádové trubce měření s hnědým uhlím, s označením VZ 001/08. Poprvé byla použita nová odběrová dvouplášťová sonda. Hrubý rozbor hnědého uhlí je uveden v Tabulce 3. Vzorek byl po přijetí na VEC, nasítován analytickými sítí ASTM o velikosti ok 80 μ m a 90 μ m za účelem dosažení zrnitosti vzorku v rozmezí 80- 90 μ m. Vzorek musí být přesně nasítován, tzn. že v nasítovaném vzorku nesmí být patrný podíl částic menších než požadovaných. Dobře nasítovaný vzorek zobrazuje Obrázek 25.



Obrázek 25 Nasítovaný vzorek o zrnitosti 80- 90 μ m

| | | |
|----------------------|------------------|----------------|
| uhlí dávkované do RK | | VZ 001/08 |
| granulometrie | | 80- 90 μ m |
| Rosin-Rammler index | | μ m |
| voda | W ^a | 12,66 % |
| popel | A ^a | 24,84 % |
| prchavá hořlavina | V ^a | 32,37 % |
| fixní uhlík | C _{fix} | 30,13 % |
| suma | | 100 % |

Tabulka 3 Hrubý rozbor hnědého uhlí VZ 001/08

Před zkouškou je třeba zvážit bezpopelové filtry, které slouží k zachycení nedopalu v zachycovači tuhých částic. Filtry se váží na laboratorních vahách OHAUS (viz Obrázek 26). Vážení filtrů proběhlo vždy po sušení v sušárně, trvajícím přes noc a vychladnutí během dalšího dne v exsikátoru (viz Obrázek 27) a to 4x pro každý filtr [6].



Obrázek 26 Váha OHAUS



Obrázek 27 Exsikátor

Po samotném spuštění PT, ustálení požadovaných parametrů (teplota reakčního plynu, koncentrace kyslíku a rychlost proudění reakčního plynu v reakční komoře), vložení filtru do zachycovače, zasunutí dávkovací sondy do požadovaného vstříku, ochlazení odběrové sondy a její následné zasunutí do RK a spuštění dávkování paliva, lze započít vlastní experimentální zkoušky. Podrobný popis spuštění a provoz PT během zkoušky je popsáno v návodu [6].

Jeden odběr trvá cca 15min, při zachyceném vzorku cca 5g. Zachycený vzorek spolu s filtrem následuje na stanovení nedopalu. Cyklus se opakuje po výměně filtru a nastavení dávkovací sondy do dalšího požadovaného vstříku.

Během zkoušky se jednotlivé parametry pro následné vyhodnocení zapisovaly do checklistu, který je znázorněn v Tabulce 4. Tyto tabulky jsou vytvořeny v programu Excel. Hodnoty z tohoto checklistu jsou pak použity do hlavní tabulky s naměřenými výsledky (viz Příloha C), které se používají pro výpočet obsahu úbytkové složky.

| Poř. č. checklistu: /10 | | | | | | Stanovení úbytku | | | |
|------------------------------|--------------|----------|------------------|---------|----------|------------------|--------------|------------|----------|
| Vzorek dle knihy vzorků VEC: | | | | | | | | | |
| Provedl (jméno, podpis): | | | | | | | | | |
| Datum měření | Číslo odběru | Bod v RK | zásah sody do RK | teplota | rychlost | kyslík | Číslo filtru | Čas odběru | poznámky |
| | | | [mm] | [°C] | [m/s] | [%] | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

Tabulka 4 Checklist

Po provedení experimentální zkoušky následuje vážení filtrů se zachyceným vzorkem, viz Obrázek 28. Tyto filtry jsou vloženy do označených žíhacích kelímků, které musíme taktéž samostatně zvážit. Kelímky i s navážkou přes noc vysušíme a necháme vychladnout v exsikátoru. Takto připravené kelímky s navážkou (viz Obrázek 29) zvážíme a dáme žíhat na 24 hodin do žíhací pece (viz Obrázek 31) na teplotu 800 °C. Po vyžhání a vychladnutí v exsikátoru kelímky opět zvážíme. Kelímek s navážkou po vyžhání je znázorněn na Obrázku 30.



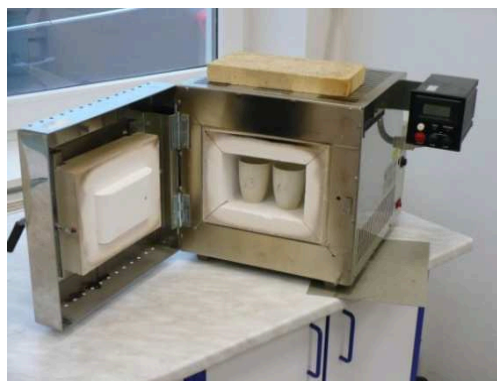
Obrázek 28 Filtr se zachyceným vzorkem



Obrázek 29 Kelímek s navážkou



Obrázek 30 Kelímek s navážkou po vyžhání



Obrázek 31 Žhací pec

Všechny tyto hodnoty se zapíší do tabulky naměřených a vypočtených hodnot (viz Příloha C). Tyto tabulky jsou sestaveny v programu Excel podle příslušných vzorců, popsaných níže, pro stanovení nedopalu a následnému sestavení křivky vyhořívání.

Výpočet se provádí pomocí programu Excelu na základě výsledku hrubého rozboru vzorku, měřením na PT a hodnot získaných při stanovení nedopalu [3]. Nejprve je pomocí rovnice (14) obsah fixního uhlíku dopočítán do 100 % podle výsledku analýzy vzorku, uvedeném v Tabulce 3.

$$C_{fix} = 100 - (W^a + A^a + V^a) \quad [\%] \quad (14)$$

Poté se zadává hmotnost odebraného vzorku a hmotnost vzorku po vyžhání, které se vypočítají rovněž pomocí programu Excel (viz Příloha). Hmotnost nadávkovaného vzorku před vstupem do RK se vypočítá dle rovnice (15) [3].

$$m_{vz,0} = \frac{m_6}{A^a} \cdot 100 \quad [g] \quad (15)$$

poté se vypočítá podíl úbytkové frakce ze vzorku před žháním (16)

$$m_{ub,fr} = m_{vz,0} - m_6 \quad [g] \quad (16)$$

hmotnost hořlaviny v odebraném vzorku se vypočítá podle rovnice (17) .

$$h_{vz} = m_5 - m_6 \quad [g] \quad (17)$$

Poslední fází je výpočet nespálené frakce, která je podílem nespálené hořlaviny ve vzorku k celkovému obsahu hořlaviny a vody v zachyceném vzorku (úbytková frakce) dle rovnice (18) [3]. Výpočet je vlastně mírou úbytku úbytkové frakce vzorku za určitou dobu setrvání v reakční komoře, násobená 100 je rovna procentuálnímu úbytku, dle rovnice (19) [3].

$$U = \frac{h_{vz}}{m_{ub,fr}} \quad [1] \quad (18)$$

$$U = \frac{h_{vz}}{m_{ub,fr}} \cdot 100\% \quad [\%] \quad (19)$$

Stanovení obsahu nedopalu ve vzorku při experimentálních zkouškách na PT se tedy provede na základě předešlých kroků pomocí rovnice (20) [3].

$$U = \frac{m_3 - m_1 - m_4}{\frac{m_4 - m_2}{A^a} \cdot 100 - m_4 + m_2} \cdot 100 \quad [\%] \quad (20)$$

Pomocí naměřených a vypočtených hodnot zapsaných v Tabulce 5 jsme sestavili křivky vyhořívání v závislosti na době setrvání částic uhlého prášku v RK a okrajových podmínkách (rychlost, teplota a koncentrace kyslíku reakčního plynu).

| 2 %obj. O ₂ , 3 m/s, 1000 °C | | | 6 %obj. O ₂ , 3 m/s, 1000 °C | | |
|---|-------------------|-----------------------|---|-------------------|-----------------------|
| Bod v RK | Čas setrvání v RK | Obsah úbytkové složky | Bod v RK | Čas setrvání v RK | Obsah úbytkové složky |
| | [ms] | [%] | | [ms] | [%] |
| 0 | - | - | 0 | 217 | 11,1 |
| 1 | 267 | 17,0 | 1 | 267 | 6,3 |
| 2 | 433 | 5,9 | 2 | 433 | 1,8 |
| 3 | 600 | 4,1 | 3 | 600 | 1,0 |
| 4 | 767 | 1,2 | 4 | 767 | -0,1 |
| 5 | 933 | 0,4 | 5 | 933 | -0,6 |
| 6 | 1100 | 5,8 | 6 | 1100 | -0,1 |
| 7 | 1267 | -1,1 | 7 | 1267 | -0,4 |
| 8 | - | - | 8 | 1433 | 0,1 |

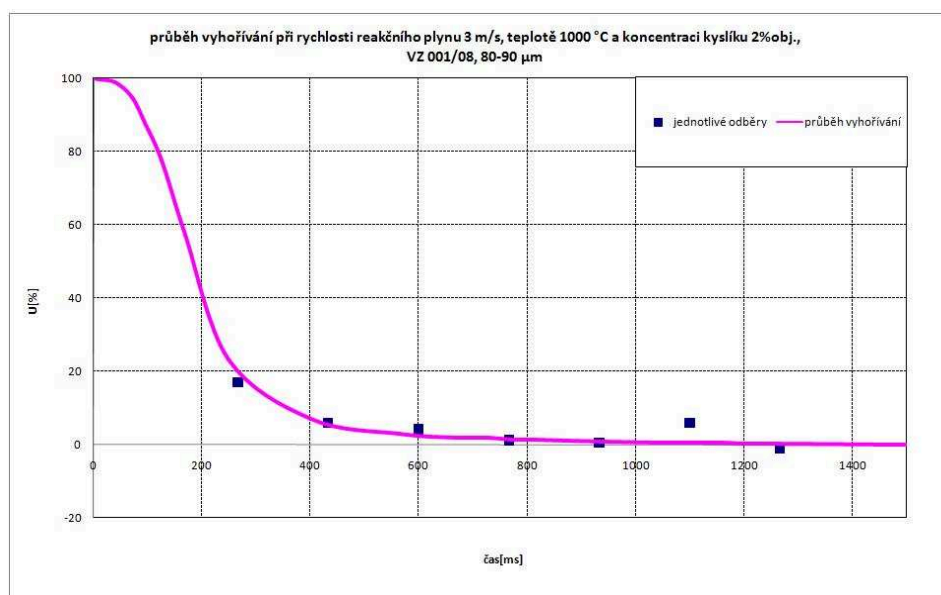
Tabulka 5 Naměřená a vypočtená data pro sestavení křivek vyhořívání VZ 001/08

Výsledné křivky vyhořívání jsou sestaveny z bodů, které odpovídají jednotlivým odběrům vzorku. Tyto body jsou proloženy regresní křivkou představující průběh vyhořívání uhlí v RK (viz. Graf 4, Graf 5).

Měření bylo uskutečněno při těchto parametrech reakčního plynu:

Režim 1 $C_{O_2} = 2\%_{obj.}$, $t = 1000^\circ\text{C}$, $v = 3\text{ m.s}^{-1}$

Tento režim byl proveden pro odběry vstříku 1 až 7 do RK. Z Grafu 4 a Přílohy C je patrné, že bod při 1100°C vykazuje odchylku od regresní křivky z důvodu špatného dávkování paliva do RK.

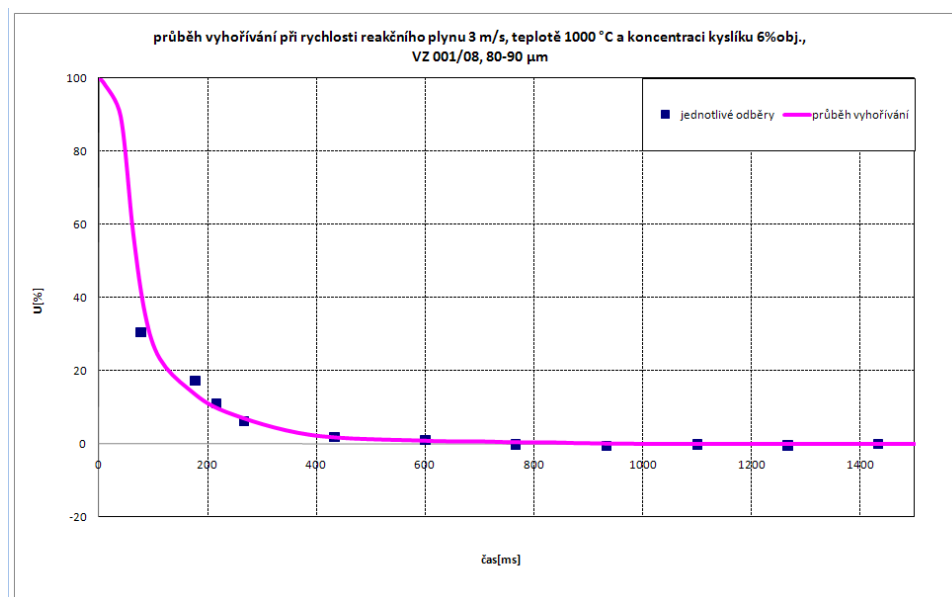


Graf 4 Křivka vyhořívání vzorku VZ 001/08 pro koncentraci kyslíku 2%

Režim 2 $C_{O_2} = 6\%_{obj.}$, $t = 1000^\circ\text{C}$, $v = 3\text{ m.s}^{-1}$

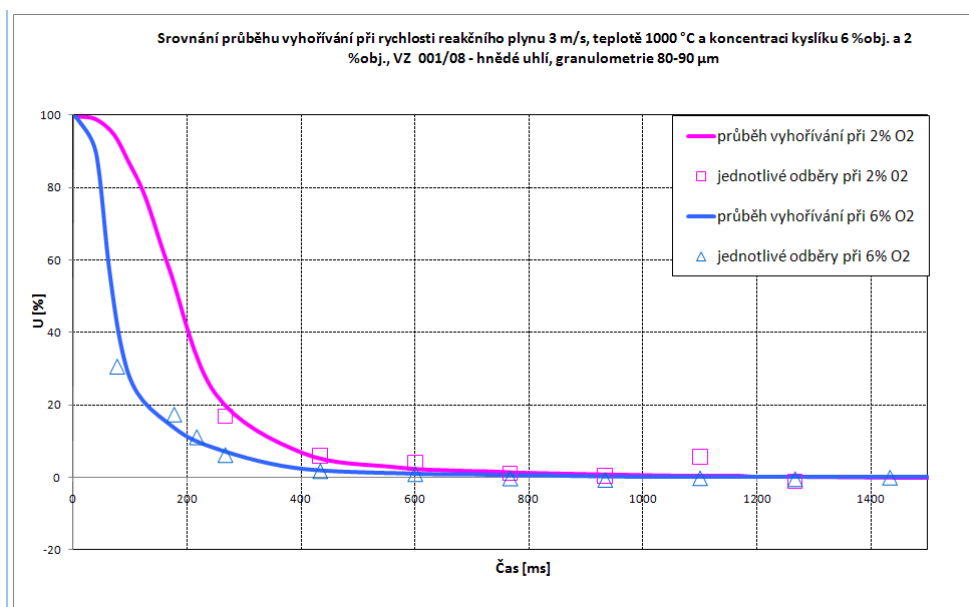
Odběry při těchto parametrech byly provedeny ve všech bodech (0 až 8) a nejlépe popisují průběh vyhoření vzorku (viz Graf 5).

Díky nové odběrové sondě, kterou můžeme zasunout z větší části do RK, dosahujeme kratších reakčních časů (viz Tabulka 5), při nichž je velice dobře dosahováno korelační shody s předpokládaným průběhem.



Graf 5 Křivka vyhořívání vzorku VZ 001/08 pro koncentraci kyslíku 6%

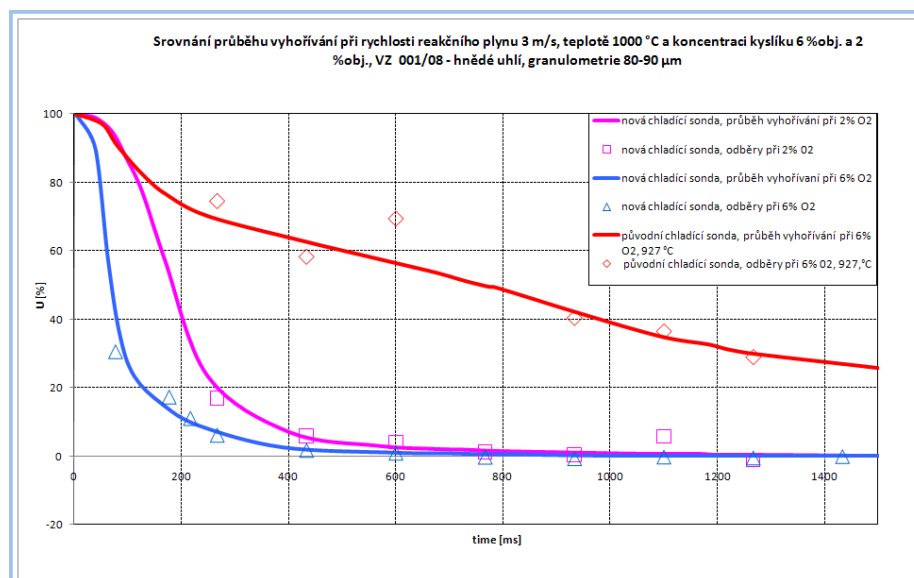
Porovnání regresních křivek režimu 1 a 2 je zobrazeno v Grafu 6. Z průběhu vyhořívání je patrný vliv změny teploty a koncentrace kyslíku v reakčním plynu.



Graf 6 Srovnání křivek vyhořívání vzorku VZ 001/08

V následujícím Grafu 7 jsou vyneseny tři křivky vyhořívání při stejné granulometrii vzorku 80 – 90 μm, ale při různé teplotě a obsahu kyslíku v RK. Červená křivka znázorňuje starou odběrovou sondu, modrá a růžová sondu novou.

Z grafu je patrné, že s novou odběrovou sondou se dosahovalo přesnějšího stanovení úbytku v různých reakčních časech. Podstatným přínosem nové sondy je možnost jejího zasunutí dovnitř RK a tím zkrátit trajektorii částic. I při těchto kratších reakčních časech je dosahováno velice slušné korelační shody s předpokládaným teoretickým průběhem.



Graf 7 Srovnání křivek vyhořívání vzorků se starou a novou odběrovou sondou

5.2 Zkoušky s černým uhlím

Pro vlastní experiment bylo použito černé uhlí s označením VZ 013/10. Hrubý rozbor vzorku je uveden v Tabulce 6. Měření probíhalo od 2.4.- 8.4. 2010 v prostorách zkušebny VEC.

| | | |
|----------------------|------------------|-----------|
| uhlí dávkované do RK | | VZ 013/10 |
| granulometrie | | 80-90 µm |
| Rosin-Rammler index | | µm |
| voda | W ^a | 0,5 % |
| popel | A ^a | 26,58 % |
| prchavá hořlavina | V ^a | 28,5 % |
| fixní uhlík | C _{fix} | 44,42 % |
| suma | | 100 % |

Tabulka 6 Hrubý rozbor černého uhlí VZ 013/10

Vzorek přijatý na VEC byl nasítován ASTM sítí o velikosti 80 µm a 90 µm za účelem dosažení zrnitosti vzorku v rozmezí 80-90 µm. Celý proces přípravy vzorku, samotných zkoušek až po vyhodnocování měření popisuje Kapitola 5.1.

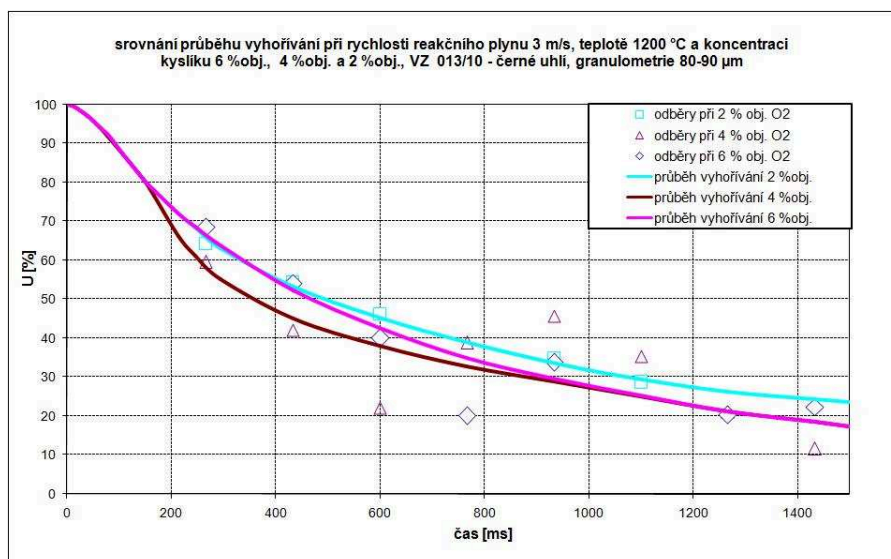
Naměřené hodnoty se zapíší do hlavní tabulky naměřených a vypočtených hodnot (viz Příloha D). Tyto tabulky jsou sestaveny v programu Excel podle příslušných vzorců, popsaných v Kapitole 5.1, pro stanovení nedopalu. Tabulka 7 představuje naměřená data pro sestavení křivek vyhořívání jednotlivých režimů.

| 2 %obj. O ₂ , 3 m/s, 1200 °C | | | 4 %obj. O ₂ , 3 m/s, 1200 °C | | |
|---|-------------------|-----------------------|---|-------------------|-----------------------|
| Bod v RK | Čas setrvání v RK | Obsah úbytkové složky | Bod v RK | Čas setrvání v RK | Obsah úbytkové složky |
| | [ms] | [%] | | [ms] | [%] |
| 0 | - | - | 0 | - | - |
| 1 | 267 | 64,2 | 1 | 267 | 59,5 |
| 2 | 433 | 54,4 | 2 | 433 | 42,1 |
| 3 | 600 | 46,2 | 3 | 600 | 22,0 |
| 4 | 767 | - | 4 | 767 | 38,8 |
| 5 | 933 | 34,8 | 5 | 933 | 45,7 |
| 6 | 1100 | 28,7 | 6 | 1100 | 35,4 |
| 7 | 1267 | - | 7 | 1267 | 21,1 |
| 8 | - | - | 8 | 1433 | 11,6 |

| 6 %obj. O ₂ , 3 m/s, 1200 °C | | |
|---|-------------------|-----------------------|
| Bod v RK | Čas setrvání v RK | Obsah úbytkové složky |
| | [ms] | [%] |
| 0 | - | - |
| 1 | 267 | 68,5 |
| 2 | 433 | 54,1 |
| 3 | 600 | 40,2 |
| 4 | 767 | 20,2 |
| 5 | 933 | 33,9 |
| 6 | 1100 | - |
| 7 | 1267 | 20,3 |
| 8 | 1433 | 22,4 |

Tabulka 7 Naměřená a vypočtená data pro sestavení křivek vyhořívání VZ 013/10

Jejich porovnání ukazuje Graf 7, kde jsou body jednotlivých režimů proloženy regresní křivkou naznačující průběh vyhořívání uhlí v reakční komoře PT. V grafu je zastoupen každý bod jedním odběrem.

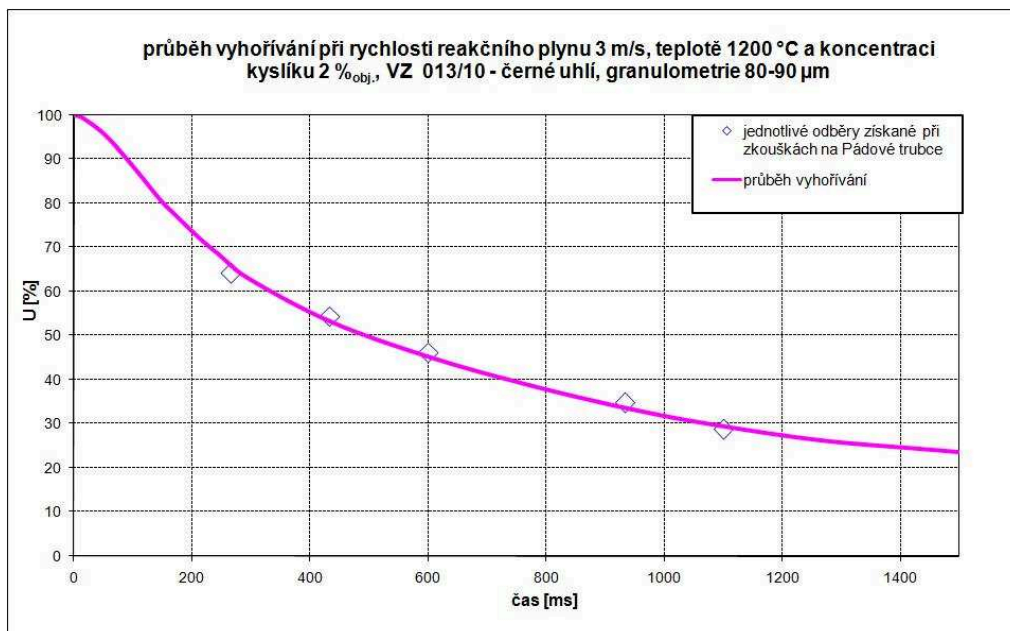


Graf 8 Srovnání křivek vyhořívání vzorku VZ 013/10

Měření bylo uskutečněno při těchto parametrech reakčního plynu:

Režim 1 $C_{O_2} = 2 \text{ \%obj.}$, $t = 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $v = 3 \text{ m.s}^{-1}$

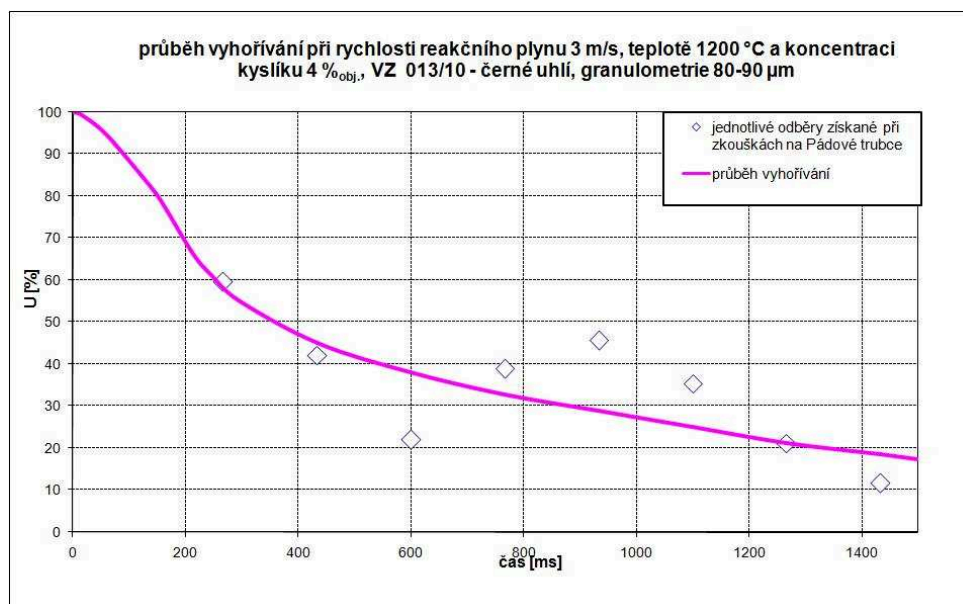
Při těchto parametrech reakčního plynu byly provedeny odběry v pěti bodech (viz Tabulka 7). Více odběru nebylo možno provést, z důvodu nevhodného ventilu na uzavěru odběru kapaliny (velká vůle), tím docházelo ke špatné regulaci přívodu dusíku, a propálení mnoha filtrů. Tyto problémy měly za následek navržení nové odběrové sondy s kryogenním ventilem, umístěným přímo u sondy (více v Kapitole 5.1). Z Grafu 9 je vidět že křivka vyhořívání je poměrně plochá, což je důsledek nízké koncentrace kyslíku v reakčním plynu.



Graf 9 Křivka vyhořívání vzorku VZ 013/10 pro koncentraci kyslíku 2 %obj

Režim 2 $C_{O_2} = 4 \text{ \%obj.}$, $t = 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $v = 3 \text{ m.s}^{-1}$

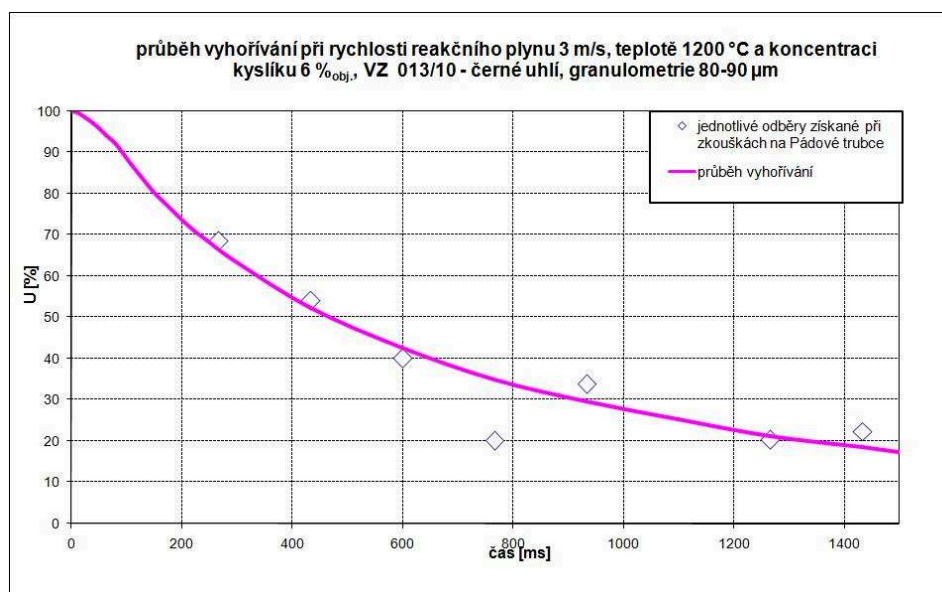
Odběry při těchto parametrech reakčního plynu byly provedeny ve všech bodech RK (viz Tabulka 7). Z Grafu 10 jsou patrné i nezdařilé odběry, což mají za následek turbulence způsobující velké skoky v tlakových poměrech, které rozkmitají otáčky dmychadla. Turbulence vznikaly kvůli nepravidelnostem v dávkování.



Graf 10 Křivka vyhořívání vzorku VZ 013/10 pro koncentraci kyslíku 4 %_{obj}

Režim 3 $C_{O_2} = 6 \text{ \%}_{obj.}$, $t = 1200 \text{ °C}$, $v = 3 \text{ m.s}^{-1}$

Při těchto parametrech reakčního plynu bylo provedeno 7 odběrů (Tabulka 7), z toho jeden odběr se nezdařil kvůli špatné funkci dávkovacího zařízení. Tento problém byl následně vyřešen, zatížením dávkovače protizávažím a odstranění vibrací přenášených do konstrukce PT. I přesto Graf 11 nejlíp popisuje průběh vyhoření vzorku.



Graf 11 Křivka vyhořívání vzorku VZ 013/10 pro koncentraci kyslíku 6 %_{obj}

6. Závěr

Hlavním cílem diplomové práce byl návrh nového kryogenního systému chlazení pomocí kapalného dusíku, který bude využíván při stanovení termokinetických vlastností uhelného prášku na experimentálním zařízení zvaném pádová trubka. Tento experimentální stend napomáhá lepšímu pochopení procesu vyhořívání uhelného prášku, který je spalován v ohništích kotlů velkého výkonu (až 1000 MWe). Výsledky z experimentálního výzkumu slouží k navrhování nových ohnišť těchto kotlů s cílem dosáhnout co nejvyšší účinnosti přeměny chemicky vázané energie v palivu na tepelnou energii a to při snaze co nejvíce snížit produkované emise plyných a tuhých znečišťujících látek. V minulosti toto zařízení využívalo k chlazení reakčního plynu technologii používanou v běžném průmyslovém procesu, která nesplňuje vysoké nároky na účinnost a přesnost celého chladicího systému. Navržením nové trasy a regulace dávkování kapalného dusíku včetně skladování dusíku v podmínkách laboratoře se zpřesní výsledky získané při experimentálních zkouškách na PT. Výsledky vývoje budou mít přínos nejen pro vlastní výzkum termokinetických vlastností uhelného prášku, ale bude je možné uplatnit také v průmyslových odvětvích, které využívají stávající technologii kryogenního chlazení.

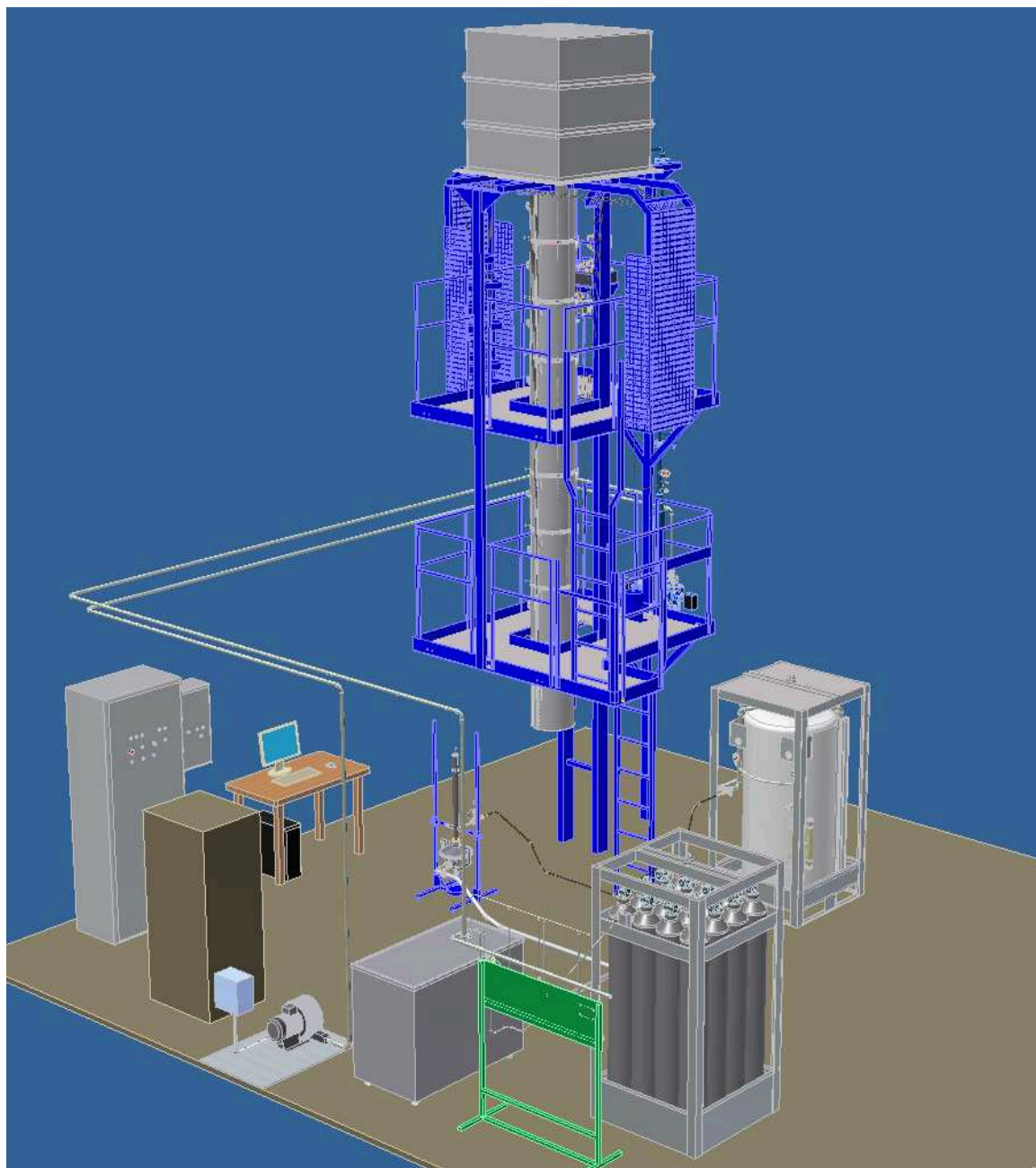
Práce je zaměřena na vývoj nové kryogenní chladicí soustavy. Soustava se skládá z nádoby pro dopravu a skladování kapalného dusíku, nového kryogenního regulačního ventilu a nové chladicí odběrové sondy. Odběrová sonda je propojena s kryogenním zásobníkem kapalného dusíku pomocí speciální tepelně izolované hadice. Tyto součásti musí zajistit co nejmenší ohřev kapalného dusíku okolním prostředím, ve kterém je teplota vzduchu o 220 °C vyšší, než je teplota kapalného dusíku. Chladicí sonda sloužící k odběru reagujícího vzorku z reakční komory z ušlechtilé oceli plní funkci kryogenního chladiče, který musí zajistit plynulé dávkování kapalného dusíku do horkého reakčního plynu o teplotě až 1200 °C a současně umožní odběr co největšího podílu vzorku z RK.

Během zkoušek se dvěma vzorky o různém obsahu fixního uhlíku byla ověřena použitelnost pádové trubky pro experimentální zkoušky jak s černým, tak také s hnědým uhlím. Vlastní provoz PT si vyžádal další úpravy, především na návrhu nové chladicí soustavy ale také na zařízení a jeho částech, které v konečném důsledku vedou k získání přesnějších výsledků stanovení termokinetických vlastností uhelného prášku, za přijatelnějších pracovních podmínek a nižších provozních nákladů.

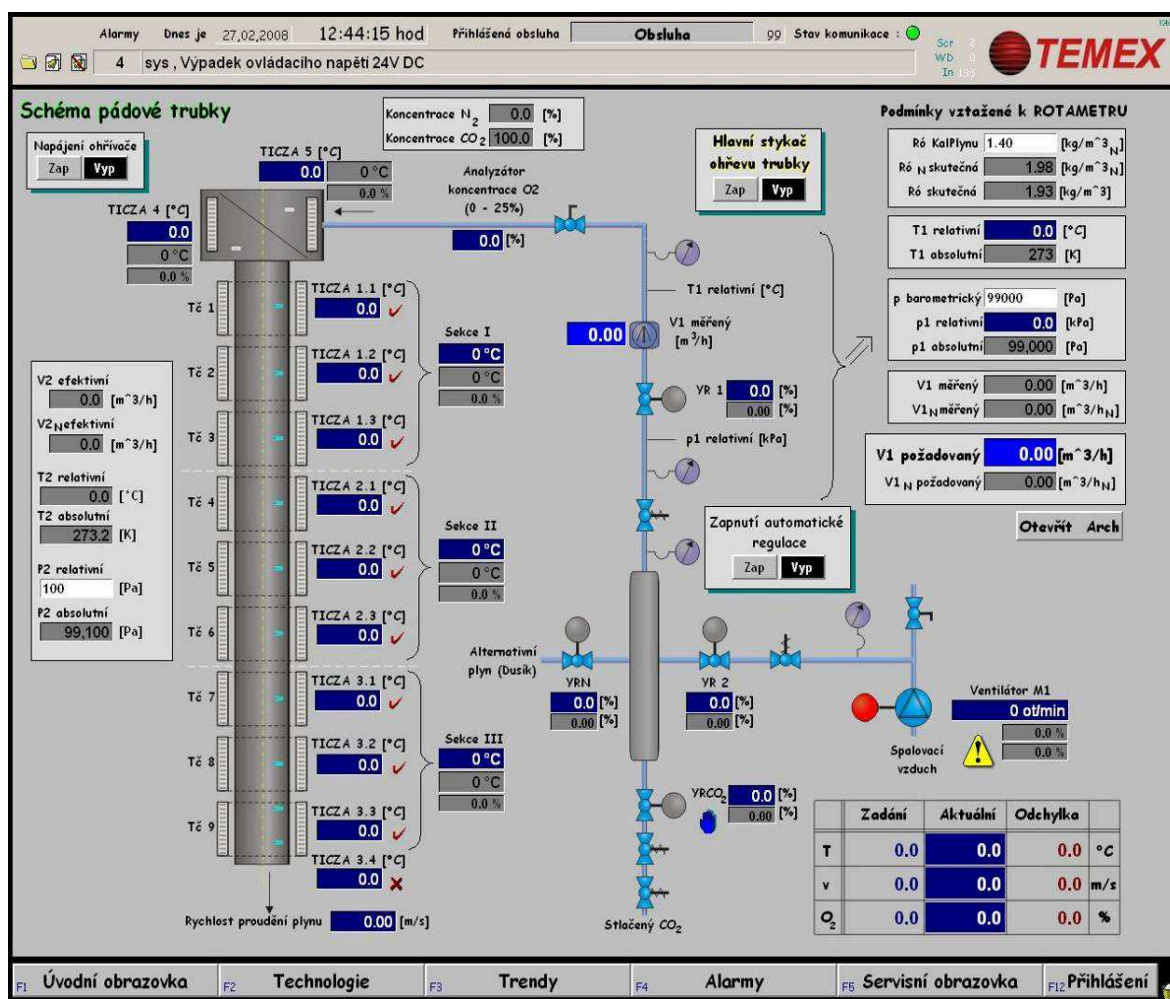
7. Použitá literatura

- [1] NOSKIEVIČ, P.: Spalování uhlí, Ostrava: VŠB- TU Ostrava, 2005, 68s. ISBN 80-248-0204-X.
- [2] BALLESTER, J., JIMÉNEZ, S.: Kinetic parameters for the oxidation of pulverized coals measured from drop tube tests. Combustion and Flame, 142 (2005), p. 210-222
- [3] Metodika VECO 004: Stanovení popela v tuhém vzorku. VŠB- TU Ostrava, Výzkumné energetické centrum, 8.4.2003
- [4] PALUSKA, R.: Výpočet nejistoty stanovení nedopalu vzorku z Pádové trubky. VŠB – TU Ostrava, Výzkumné energetické centrum, 12.1.2010
- [5] BARTOVSKÁ, L.: Chemická kinetika. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Praha 2008. ISBN 978-80-7080-670-8
- [6] Metodika VECS: Stanovení termokinetických vlastností práškového uhlí. VŠB- TU Ostrava, Výzkumné energetické centrum, 20.9.2008
- [7] Uhelná energetika
URL: <http://tezba-a-vyuziti-cerneho-uhli.webnode.cz>
- [8] Těžba uhlí
URL: <http://www.okd.cz/cz/tezime-uhli/>
- [9] Vývojové trendy uhelné energetiky
URL: <http://www.tencl.cz/temelin/temel031.htm>
- [10] Vlastnosti paliva
URL: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%AD>
- [11] Chemická kinetika, reakční rychlost
URL: http://cs.wikipedia.org/wiki/Reak%C4%8Dn%C3%AD_rychlost

8. Přílohy



Příloha A 3D model celého systému PT



Příloha B Hlavní okno vizualizace na PC

| Datum měření | | Číslo odběru | | teplota | rychlost | kyslík | Bod v RK | Číslo kelímku | Číslo filtru | hmotnost t filtru m ₁ | hmotnost kelímku m ₂ | hmotnost kelímku s nádžkou m ₃ | hmotnost po vyčištění m ₄ | W ^a | A ^a | hmotnost odebraného vzorku m _s | hmotnost vzorku po žhárání m _g | rozdíl m _s -m _g | hm. nádžk- vzorku m _{u,0} | z toho úbytková frakce m _{u,fr} | hořlavina vzorku h _{cz} | čas setrvání v RK | obsah úbytkové složky | U | použitelnost | Poznámky z měření |
|--|----|--------------|--------|---------|---------------|--------------|----------|---------------|--------------|--|---------------------------------------|--|--|----------------|----------------|--|--|--|---|---|--|----------------------|-----------------------------|------------------------------------|--|-------------------|
| Čas měření | TC | [m/s] | [%vol] | [mm] | Číslo kelímku | Číslo filtru | [g] | [g] | [g] | [g] | [g] | [g] | [g] | [%vol] | [%vol] | [g] | [g] | [g] | [g] | [g] | [g] | [s] | [%vol] | [%vol] | | |
| VZ 001/08, 80-90 µm, Rosin-Ramner index µm | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21.9.2010 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14.51 | 0 | 1000 | 3 | 6 | 4 | 0 | 2 | x3.29 | 5,7083 | 66,1762 | 73,7109 | 66,9115 | 12,66 | 24,84 | 1,8264 | 0,7353 | 1,0911 | 2,9601 | 2,2248 | 1,0911 | 767 | 49,04 | ± 3,26 | ok | vzorek z misku, zkouška, částice propáleny | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | filtr | |
| 14.39 | 1 | 1000 | 3 | 6 | 0 | 160 | 0 | x3.28 | 5,4203 | 65,4391 | 76,4847 | 69,6341 | 12,66 | 24,84 | 5,6254 | 4,1950 | 1,4304 | 16,8881 | 12,6931 | 1,4304 | 217 | 11,27 | ± 1,06 | ok | vzorek ok | |
| 15.22 | 2 | 1000 | 3 | 6 | 0 | 380 | 16 | x3.27 | 5,6256 | 65,6789 | 77,6705 | 69,6560 | 12,66 | 24,84 | 6,3691 | 4,1771 | 2,1920 | 16,8160 | 12,6389 | 2,1920 | 177 | 17,34 | ± 0,94 | ok | ok, vysoké oděvy 2500µ | |
| 15.52 | 3 | 1000 | 3 | 6 | 0 | 570 | 33 | x3.26 | 5,7136 | 79,3022 | 86,2890 | 79,9640 | 12,66 | 24,84 | 1,2732 | 0,6618 | 0,6114 | 2,6643 | 2,0025 | 0,6114 | 77 | 30,53 | ± 4,68 | ok | propálený filtr | |
| 16.18 | 4 | 1000 | 3 | 6 | 0 | 570 | 17 | x3.25 | 5,3827 | 63,8969 | 72,5388 | 65,5553 | 12,66 | 24,84 | 3,2592 | 1,6684 | 1,6008 | 6,6763 | 5,0179 | 1,6008 | 77 | 31,90 | ± 1,83 | ok | ok | |
| 10.14 | 5 | 1000 | 3 | 6 | 2 | 0 | 18 | x3.24 | 5,5857 | 72,3462 | 78,3455 | 72,7571 | 12,66 | 24,84 | 0,4136 | 0,4109 | 0,0027 | 1,6542 | 1,2433 | 0,0027 | 433 | 0,22 | ± 14,40 | malo vzorku | | |
| 10.38 | 6 | 1000 | 3 | 6 | 2 | 0 | 57 | x3.23 | 5,7527 | 63,9458 | 71,9815 | 66,0992 | 12,66 | 24,84 | 2,2831 | 2,1534 | 0,1296 | 8,6691 | 6,5157 | 0,1296 | 433 | 1,99 | ± 2,61 | ok | ok | |
| 11.06 | 7 | 1000 | 3 | 6 | 3 | 0 | 54 | x3.21 | 5,6327 | 63,5676 | 71,0318 | 65,3431 | 12,66 | 24,84 | 1,8415 | 1,7855 | 0,0560 | 7,1880 | 5,4025 | 0,0560 | 600 | 1,04 | ± 3,23 | ok | ok | |
| 12.28 | 8 | 1000 | 3 | 6 | 4 | 0 | 60 | x3.20 | 5,7563 | 64,1146 | 70,9242 | 65,1720 | 12,66 | 24,84 | 1,0533 | 1,0574 | -0,0041 | 4,2568 | 3,1994 | -0,0041 | 767 | -0,13 | ± 5,66 | ok | ok | |
| 12.51 | 9 | 1000 | 3 | 6 | 5 | 0 | 15 | x3.19 | 5,3205 | 70,8736 | 78,0686 | 72,7742 | 12,66 | 24,84 | 1,8745 | 1,9006 | -0,0261 | 7,6514 | 5,7508 | -0,0261 | 933 | -0,45 | ± 3,18 | ok | ok | |
| 13.22 | 10 | 1000 | 3 | 6 | 6 | 0 | 70 | x3.18 | 5,6199 | 59,1906 | 67,0480 | 61,4355 | 12,66 | 24,84 | 2,2375 | 2,2449 | -0,0074 | 9,0374 | 6,7925 | -0,0074 | 1100 | -0,11 | ± 2,66 | ok | ok | |
| 13.47 | 11 | 1000 | 3 | 6 | 7 | 0 | 67 | x3.17 | 5,7452 | 58,4075 | 64,5052 | 58,8409 | 12,66 | 24,84 | 0,3525 | 0,4334 | -0,0809 | 1,7448 | 1,3114 | -0,0809 | 1267 | -5,17 | ± 16,90 | malo vzorku | | |
| 14.10 | 12 | 1000 | 3 | 6 | 7 | 0 | 8 | x3.16 | 5,3710 | 75,1539 | 84,0900 | 78,7449 | 12,66 | 24,84 | 3,5651 | 3,5910 | -0,0259 | 14,4565 | 10,8655 | -0,0259 | 1267 | -0,24 | ± 1,67 | ok | oděr 20mm, ok | |
| 14.39 | 13 | 1000 | 3 | 6 | 8 | 0 | 58 | x3.15 | 5,6121 | 67,4826 | 76,7918 | 71,1739 | 12,66 | 24,84 | 3,6971 | 3,6913 | 0,0058 | 14,8603 | 11,1690 | 0,0058 | 1433 | 0,05 | ± 1,61 | ok | ok | |
| 15.36 | 14 | 1000 | 3 | 6 | 1 | 0 | 13 | x3.13 | 5,4011 | 67,0521 | 75,0817 | 69,2622 | 12,66 | 24,84 | 2,6285 | 2,2101 | 0,4184 | 8,8973 | 6,6872 | 0,4184 | 267 | 6,26 | ± 2,27 | ok | ok | |
| 9.33 | 15 | 1000 | 3 | 2 | 1 | 0 | 56 | x3.12 | 5,5858 | 60,0671 | 66,7717 | 60,8065 | 12,66 | 24,84 | 1,1188 | 0,7395 | 0,3793 | 2,9771 | 2,2376 | 0,3793 | 267 | 16,95 | ± 5,32 | ok | ok | |
| 9.53 | 16 | 1000 | 3 | 2 | 2 | 0 | 30 | x3.11 | 5,6748 | 74,6794 | 80,9240 | 75,1532 | 12,66 | 24,84 | 0,5698 | 0,4738 | 0,0960 | 1,9074 | 1,4336 | 0,0960 | 433 | 6,70 | ± 10,45 | malo vzorku | | |
| 10.25 | 17 | 1000 | 3 | 2 | 3 | 0 | 14 | x3.10 | 5,4131 | 64,2769 | 70,6419 | 65,1237 | 12,66 | 24,84 | 0,9519 | 0,8468 | 0,1051 | 3,4090 | 2,5622 | 0,1051 | 600 | 4,10 | ± 6,26 | ok | ok | |
| 10.57 | 18 | 1000 | 3 | 2 | 4 | 0 | 11 | x3.9 | 5,6177 | 65,1838 | 71,3840 | 65,7466 | 12,66 | 24,84 | 0,5825 | 0,5628 | 0,0197 | 2,2657 | 1,7029 | 0,0197 | 767 | 1,16 | ± 10,23 | ok | ok | |
| 11.31 | 19 | 1000 | 3 | 2 | 5 | 0 | 55 | x3.8 | 5,7256 | 61,0613 | 67,4260 | 61,6925 | 12,66 | 24,84 | 0,6391 | 0,6312 | 0,0079 | 2,5411 | 1,9099 | 0,0079 | 933 | 0,41 | ± 9,32 | malo vzorku | | |
| 12.17 | 20 | 1000 | 3 | 2 | 6 | 0 | 26 | x3.7 | 5,3591 | 70,3267 | 76,5399 | 71,0537 | 12,66 | 24,84 | 0,8542 | 0,7210 | 0,1272 | 2,9267 | 2,1997 | 0,1272 | 1100 | 5,78 | ± 6,97 | nebylo zaplněno čepem na dávkování | | |
| 12.27 | 21 | 1000 | 3 | 2 | 6 | 0 | 68 | x3.6 | 5,6126 | 63,2647 | 69,7303 | 64,1688 | 12,66 | 24,84 | 0,9030 | 0,9041 | -0,0011 | 3,6397 | 2,7356 | -0,0011 | 1100 | -0,04 | ± 6,60 | malo vzorku | | |
| 12.51 | 22 | 1000 | 3 | 2 | 7 | 0 | 51 | x3.5 | 5,6690 | 66,4740 | 72,9291 | 67,2770 | 12,66 | 24,84 | 0,7862 | 0,8030 | -0,0168 | 3,2327 | 2,4297 | -0,0168 | 1267 | -0,69 | ± 7,58 | ok | ok | |

Příloha C Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro stanovení nedopalu ze vzorku VZ 001/08

| Datum měření | | VZ 013/10, 80-90 µm, Rosin-Rammler index µm | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | použitelnost | | Poznámky z měření |
|--|--------------|---|----------------|---------------|----------|---------------------------|---------------|--------------|------------------------------------|--|--|-----------------------|------------------------------------|---|--|---|--------------------------------------|------------------------|------------------------------|----------|---------|---------|--|--------------|--|-------------------|
| Čas měření | Číslo odběru | teplota [°C] | rychlost [m/s] | kyslík [%vol] | Bod v RK | zasunutí sondy do RK [mm] | Číslo kelímků | Číslo filtru | hmotnost filtru m ₁ [g] | hmotnost kelímku s náložkou m ₂ [g] | hmotnost po vyžhání m ₃ [g] | A ⁸ [%vol] | hmotnost vzorku m ₅ [g] | hmotnost vzorku po žhání m ₆ [g] | hm. nadávk. vzorku m _{vz,0} [g] | z toho úbytková frakce m _{ub,fr} [g] | hořlavina vzorku h _{uz} [g] | čas seřazení v RK [ms] | obsah úbytkové složky [%vol] | U [%vol] | | | | | | |
| zníženo 6 filtrů, nádobka č. 09000620 má velkou vůli (nehodný ventl na uzavření odběru kapaliny) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23.3. | 13.25 | 3 | 1200 | 3 | 2 | 6 | - | 8 | x8.18 | 5,6168 | 75,1536 | 82,5627 | 76,1450 | 26,58 | 1,7823 | 0,9914 | 3,7299 | 2,7385 | 0,7909 | 1100 | 28,88 | ± 3,39 | dusík uniká pojišťovákem | | | |
| | 13.03 | 4 | 1200 | 3 | 2 | 5 | - | 5 | x8.19 | 5,6565 | 62,8899 | 70,6945 | 63,9830 | 26,58 | 2,1491 | 1,0941 | 4,1163 | 3,0222 | 1,0550 | 933 | 34,91 | ± 2,81 | snížená rychlost plynu, málo vzorku | | | |
| 2.4. | 12.21 | 7 | 1200 | 3 | 2 | 3 | - | 4 | x8.37 | 5,6019 | 66,5692 | 72,7228 | 66,8098 | 26,58 | 0,5517 | 0,2406 | 0,9052 | 0,6646 | 0,3111 | 600 | 46,82 | ± 10,96 | zpočátku nedávkovali dávkovač, pak ok, rei málo vzorku | | | |
| | 12.47 | 8 | 1200 | 3 | 2 | 2 | - | 10 | x8.38 | 5,4063 | 63,4801 | 70,3803 | 64,0767 | 26,58 | 1,4939 | 0,5966 | 2,2445 | 1,6479 | 0,8973 | 433 | 54,45 | ± 4,05 | opraven přetlakový ventl na odběrové sondě, ok | | | |
| | 13.12 | 9 | 1200 | 3 | 2 | 1 | - | 11 | x8.39 | 5,6206 | 65,6323 | 72,4794 | 66,0745 | 26,58 | 1,2265 | 0,4422 | 1,6637 | 1,2215 | 0,7843 | 267 | 64,21 | ± 4,93 | ok | | | |
| 7.4. | 13.14 | 10 | 1200 | 3 | 6 | 1 | - | 17 | x8.12 | 5,6591 | 63,8953 | 70,7991 | 64,3255 | 26,58 | 1,2447 | 0,4302 | 1,6185 | 1,1883 | 0,8145 | 267 | 68,54 | ± 4,86 | ok | | | |
| | 13.40 | 11 | 1200 | 3 | 6 | 2 | - | 26 | x8.11 | 5,4577 | 70,3269 | 77,2184 | 70,9015 | 26,58 | 1,4338 | 0,5746 | 2,1618 | 1,5872 | 0,8592 | 433 | 54,14 | ± 4,22 | ok | | | |
| | 14.08 | 12 | 1200 | 3 | 6 | 3 | - | 15 | x8.10 | 5,3690 | 70,8733 | 77,6390 | 71,5260 | 26,58 | 1,3767 | 0,6527 | 2,4556 | 1,8029 | 0,7240 | 600 | 40,16 | ± 4,39 | ok | | | |
| | 14.30 | 13 | 1200 | 3 | 6 | 4 | - | 18 | x8.9 | 5,6232 | 72,3462 | 79,2469 | 73,1669 | 26,58 | 1,2775 | 0,8207 | 3,0877 | 2,2670 | 0,4568 | 767 | 20,15 | ± 4,73 | ok, čím dál méně vzorku | | | |
| | 14.55 | 14 | 1200 | 3 | 6 | 5 | - | 22 | x8.8 | 5,6103 | 70,9804 | 78,9368 | 72,1918 | 26,58 | 2,3451 | 1,2114 | 4,5576 | 3,3462 | 1,1337 | 933 | 33,88 | ± 2,58 | ok, hodně vzorku | | | |
| | 15.20 | 15 | 1200 | 3 | 6 | 6 | - | 3 | x8.6 | 5,6365 | 66,5697 | 72,5247 | 66,4985 | 26,58 | 0,3185 | -0,0712 | -0,2679 | -0,1967 | 0,3897 | 1100 | -198,14 | ± 18,99 | málo vzorku, opakování odběru 15.38 | | | |
| | 10.01 | 16 | 1200 | 3 | 6 | 7 | - | 23 | x8.5 | 5,6317 | 69,1442 | 75,7176 | 69,7474 | 26,58 | 0,9417 | 0,6032 | 2,2694 | 1,6662 | 0,3385 | 1267 | 20,32 | ± 6,42 | málo vzorku i po 40 min. dávkování | | | |
| | 11.55 | 17 | 1200 | 3 | 6 | 8 | - | 12 | x8.4 | 5,4536 | 71,8987 | 78,8333 | 72,8138 | 26,58 | 1,4811 | 0,9151 | 3,4428 | 2,5277 | 0,5660 | 1433 | 22,39 | ± 4,08 | ok | | | |
| | 12.05 | 18 | 1200 | 3 | 4 | 8 | - | 20 | x8.3 | 5,6478 | 72,3414 | 80,3840 | 74,1556 | 26,58 | 2,3949 | 1,8142 | 6,8254 | 5,0112 | 0,5806 | 1433 | 11,59 | ± 2,52 | ok | | | |
| | 12.56 | 19 | 1200 | 3 | 4 | 7 | - | 13 | x8.2 | 5,6475 | 67,0527 | 74,3991 | 68,1255 | 26,58 | 1,6989 | 1,0728 | 4,0361 | 2,9633 | 0,6261 | 1267 | 21,13 | ± 3,56 | ok | | | |
| 8.4. | 13.25 | 20 | 1200 | 3 | 4 | 6 | - | 16 | x8.1 | 5,4438 | 65,6806 | 72,7844 | 66,5197 | 26,58 | 1,6600 | 0,8391 | 3,1589 | 2,3178 | 0,8209 | 1100 | 35,42 | ± 3,64 | ok, částečně zvýšený O ₂ (o 1%) | | | |
| | 13.52 | 21 | 1200 | 3 | 4 | 5 | - | 25 | x8.7 | 5,4239 | 64,1237 | 70,9147 | 64,7283 | 26,58 | 1,3672 | 0,6046 | 2,2746 | 1,6700 | 0,7625 | 933 | 45,66 | ± 4,42 | ok, dmychadlo 1100-1300 ot/min | | | |
| | 14.19 | 22 | 1200 | 3 | 4 | 4 | - | 14 | x8.13 | 5,5811 | 64,2763 | 71,1498 | 64,9000 | 26,58 | 1,2924 | 0,6237 | 2,3465 | 1,7228 | 0,6687 | 767 | 38,82 | ± 4,68 | ok | | | |
| | 14.44 | 23 | 1200 | 3 | 4 | 3 | - | 19 | x8.32 | 5,3549 | 61,3752 | 67,7911 | 62,0347 | 26,58 | 1,0610 | 0,6595 | 2,4812 | 1,8217 | 0,4015 | 600 | 22,04 | ± 5,70 | ok | | | |
| | 15.08 | 24 | 1200 | 3 | 4 | 2 | - | 11 | x9.11 | 5,6290 | 65,1843 | 72,3866 | 65,8984 | 26,58 | 1,5453 | 0,7141 | 2,6866 | 1,9725 | 0,8312 | 433 | 42,14 | ± 3,91 | ok | | | |
| | 15.33 | 25 | 1200 | 3 | 4 | 1 | - | 21 | x9.12 | 5,5948 | 66,2567 | 75,4686 | 67,6244 | 26,58 | 3,6171 | 1,3677 | 5,1456 | 3,7779 | 2,2494 | 267 | 59,54 | ± 1,67 | přiložena chla na dávkovač, spousta vzorku | | | |

Příloha D Tabulka naměřených a vypočtených hodnot pro stanovení nedopalu ze vzorku VZ 013/10